



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Trabajo Final de Maestría - Análisis de Casos en Proyectos con Enfoque Social: Microrredes y la Comunidad

María Angélica Ruiz Villadiego

Trabajo final presentado como requisito parcial para obtener el título de:
Maestría en Ingeniería - Sistemas Energéticos

Director:

Carlos Jaime Franco Cardona

Codirectora:

Estefany Garcés Arango

Universidad Nacional de Colombia – sede Medellín
Facultad de Minas
Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión
Medellín, Colombia
2019

Resumen

Uno de los aspectos que más influye en la medición del progreso de un país, es el nivel de acceso a electricidad que tienen sus habitantes. En el mundo miles de millones de personas aún carecen de acceso a este servicio público esencial, lo que lo convierte en uno de los grandes retos de sostenibilidad que enfrentan las naciones para asegurar su desarrollo. Las energías renovables como sistema surgen como respuesta para cubrir la necesidad energética de aquellas comunidades que no pueden acceder a un sistema interconectado tradicional. En este nuevo sistema, la comunidad asume el rol de actor principal.

Este documento presenta un trabajo final de grado de maestría en modo profundización, abordando el tema de proyectos de enfoque social que toman las nuevas aplicaciones de generación distribuida, en particular el tema de microrredes. Busca el desarrollo de la caracterización de una comunidad en Colombia que permita analizar el impacto de la inclusión de este tipo de tecnologías a zonas remotas del país donde no se tiene acceso a la red del sistema interconectado.

Los resultados de este trabajo de investigación contribuirán a un nivel teórico, conceptual y práctico al desarrollo de nuevo conocimiento que permita medir la viabilidad y sostenibilidad de la inclusión de nuevas alternativas que permitan suplir la energía eléctrica de una comunidad fuera de red.

Palabras Clave

Comunidad, microrredes, proyectos, sostenibilidad, transición energética.

Abstract

One of the aspects that influences the most the measurement of a country's progress is the ease of access to electricity by its inhabitants. Billions of people in the world still lack access to this essential public service, which makes it one of the great sustainability challenges that nations face to ensure their development. Renewable energies as a system, surges as a response to cover the electrical energy needs of those communities that cannot access a traditional interconnected system. In this new system, community assumes the principal actor role.

This document presents a final project as a condition to apply for master degree, addressing the topic of social approach in projects that implement distributed generation and microgrids. The main objective is to characterize a community in Colombia and analyze the impact of the inclusion of this kind of technology in remote areas of the country where there is no access to the traditional national grid.

Keywords

Community, energy transition, microgrids, projects, sustainability.

Tabla de Contenido

Resumen	2
Palabras Clave.....	2
Abstract	2
Keywords	2
1. Introducción.....	6
2. Antecedentes.....	10
3. Marco Teórico.....	12
3.1. Acceso a la electrificación.....	12
3.2. Desarrollo Sostenible.....	12
3.3. Electrificación y desarrollo rural sostenible.....	13
3.4. Microrredes	14
3.5. Tecnologías y aplicaciones de microrredes en comunidades.....	14
3.6. Caracterización y análisis de sensibilidad de modelos con enfoque social	15
4. Revisión de literatura	17
4.1. Energía Sostenible.....	17
4.2. Políticas Gubernamentales	17
4.3. Aceptación de la Comunidad	19
4.4. Transición Energética.....	20
4.5. Trabajos Previos	22
5. Objetivos.....	23
5.1. Objetivo General	23
5.2. Objetivos Específicos	23
6. Metodología.....	24
6.1. Descripción del caso de estudio.....	24
6.2. Descripción del modelo	26
6.2.1. Descripción de la estructura del modelo	26
6.2.2. Descripción de la implementación del modelo.....	30
7. Validación del modelo.....	38
7.1. Prueba de verificación de parámetros	38
7.2. Prueba de valores extremos	40
7.3. Prueba de consistencia dimensional	43
7.4. Análisis de sensibilidad	44

8.	Análisis de resultados	46
8.1.	Análisis de casos.....	46
8.2.	Análisis de resultados	48
9.	Conclusiones y Recomendaciones	53
9.1.	Conclusiones	53
9.2.	Recomendaciones	54
10.	Referencias	55

Lista de Tablas

Tabla 6-1.	Dinámica poblacional de caso de estudio.	25
Tabla 6-2.	Picos de demanda eléctrica diaria de caso de estudio.	30
Tabla 6-3.	Costos de los componentes del sistema fotovoltaico de la microrred para el caso de estudio.....	31
Tabla 6-4.	Costos en dólares por kW de los componentes del sistema fotovoltaico de la microrred para el caso de estudio.	32
Tabla 6-5.	Costos totales de inversión de los componentes del sistema fotovoltaico de la microrred para el caso de estudio.	32
Tabla 6-6.	Costos totales operacionales o gastos AOM anuales asociados al mantenimiento de los componentes del sistema de la microrred para el caso de estudio.	33
Tabla 6-7.	Generación real por año dentro de la ventana de vida útil del sistema de la microrred.	34
Tabla 7-1.	Descripción y explicación de parámetros implementados en el modelo.	38
Tabla 7-2.	Verificación dimensional de los principales grupos de variables, niveles, flujos y parámetros.	43
Tabla 8-1.	Costos totales operacionales o gastos AOM de los componentes del sistema de la microrred para el caso de operación de parte del operador de red.	47

Lista de Figuras

Figura 4-1.	Tres dimensiones del concepto de aceptación social de las innovaciones de energía renovable como lo son las Microrredes.....	20
Figura 6-1.	Hipótesis dinámica – Diagrama Causal General.....	27
Figura 6-2.	Diagrama de niveles y flujos: módulo usos y demanda.....	28
Figura 6-3.	Diagrama de niveles y flujos: módulo potencia y energía.	28
Figura 6-4.	Diagrama de niveles y flujos: módulo recaudos y generación.....	29
Figura 6-5.	Curva de carga horaria del caso de estudio.	30
Figura 6-6.	Comportamiento del recaudo del sistema de la microrred dentro de la ventana de estudio de 30 años con un valor tarifario de 0,043 USD/kWh.	35
Figura 6-7.	Comportamiento del recaudo del sistema de la microrred dentro de la ventana de estudio de 30 años con un valor tarifario de 0,046 USD/kWh.	36

Figura 6-8. Comportamiento del recaudo del sistema de la microrred dentro de la ventana de estudio de 30 años con un valor tarifario de 0,065 USD/kWh.	37
Figura 7-1. Demanda y generación eléctrica constantes en el tiempo.	41
Figura 7-2. Demanda de electricidad y generación de electricidad inexistente o igual a cero.	42
Figura 7-3. Generación de electricidad inexistente y permanencia de la demanda eléctrica y su respectivo crecimiento.	42
Figura 7-4. Incremento en el recaudo neto como consecuencia de la ausencia de los costos operativos asociados al mantenimiento del sistema.	43
Figura 7-5. Sensibilidad del recaudo (z), los recursos financieros de la red y los ahorros para reposiciones de baterías frente al cambio de la tarifa calculada.	45
Figura 8-1. Valor referencial de recaudo neto (Z) luego de pasar por el punto de equilibrio para el caso de operación comunitaria.	49
Figura 8-2. Valor referencial de recaudo neto (Z) luego de pasar por el punto de equilibrio para el caso de operación por parte del operador de red.	50
Figura 8-3. Valor referencial de recaudo neto (Z) luego de pasar por el punto de equilibrio para el caso de operación comunitaria con subsidios.	51
Figura 8-4. Valor referencial de recaudo neto (Z) luego de pasar por el punto de equilibrio para el caso de operación por parte del operador de red y subsidios.	52

1. Introducción

Es difícil exagerar el impacto de la electrificación en la sociedad. Las invenciones de Thomas Edison, Nikola Tesla y muchos otros transformaron la vida cotidiana de las personas. La Academia Nacional Estadounidense de Ingeniería –*U.S. National Academy of Engineering*– considera a la electrificación como el logro más grande de la ingeniería del siglo XX (O'Connor & Jacobs, 2018). Sin embargo, las bajas tasas de acceso a la electricidad en los países en vía de desarrollo, hoy en día, representan un obstáculo importante para el desarrollo económico y social sostenible, especialmente en las zonas rurales (Williams, Jaramillo, Taneja, & Ustun, 2015). La Agencia Internacional de Energía (IEA) estima que aproximadamente 1.100 millones de personas en el mundo, principalmente en el sur de Asia y el África subsahariana, aún carecen de conexión a la electricidad (Vinci et al., 2017).

La disponibilidad de servicios de electricidad constituye una necesidad para la mayoría de las actividades en la vida moderna, y se ha demostrado que juega un papel importante en el impulso de los resultados socioeconómicos (Jimenez, 2017). La falta de electricidad en las comunidades rurales también se ha relacionado con las disparidades en el desarrollo regional dentro de los países y el aumento de la migración de la población rural hacia las urbes, lo que tensiona los sistemas de infraestructura de las zonas urbanas. Por esta razón, el acceso a la electricidad ha cobrado mayor importancia en los últimos años en la agenda de desarrollo global (Williams et al., 2015).

Todas estas transiciones tienen la necesidad del desarrollo del pensamiento creativo para idear nuevas estrategias y alcanzar aquellas zonas que aún no tienen acceso al servicio de energía eléctrica (O'Connor & Jacobs, 2018). Este creciente interés en lograr un acceso universal a la energía ha estado llamando la atención sobre la electrificación rural y aquellas tecnologías que van más allá del enfoque de sistema centralizado (Mandelli, Barbieri, Mereu, & Colombo, 2016). En ausencia de sistemas heredados (redes de gran envergadura basados en diferentes tecnologías), los países en desarrollo tienen la oportunidad de aprovechar décadas de avances tecnológicos y la experiencia de países desarrollados a medida que se van construyendo sus sistemas de infraestructura modernos e innovadores.

Las microrredes, pequeñas redes de electricidad que tienen la capacidad de operar de manera autónoma, pueden jugar un papel clave en el desarrollo de una infraestructura eléctrica construida en torno a las tecnologías descentralizadas de energías renovables (Williams et al., 2015). Si bien existe un gran optimismo sobre la alternativa que representan las tecnologías basadas en energías renovables para mejorar la situación energética, existe un desconocimiento y comprensión de las estrategias necesarias para lograr sistemas energéticos exitosos y sostenibles (Akinyele & Rayudu, 2016).

Colombia es un ejemplo de que aunque se han realizado esfuerzos para la electrificación rural mediante la creación de fondos que otorgan apoyo financiero para la electrificación de estas áreas (FAZNI), aún no se alcanza la cobertura requerida para abastecer al 100% de la población (UPME, 2015). Las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia representan el 51% del área física del país (70 municipios, 36 cabeceras municipales y 1697 localidades codificadas) y 218,401 usuarios habitan

en estas zonas (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018). Cerca de 3 millones de hogares colombianos están localizados en áreas remotas, de las cuales el 83% tienen electricidad (Vides-Prado et al., 2018).

Existe gran cantidad de referencias que dan cuenta de las opciones que tiene Colombia para adoptar la perspectiva renovable para la diversificación de su mercado energético y suplir electricidad a áreas remotas donde cerca de un millón de hogares no tienen un servicio de electricidad confiable. Uno de los aspectos en los que coinciden estos estudios es el potencial del país en lo que respecta a los recursos de energía renovable (Vides-Prado et al., 2018).

Existen dos situaciones que vale la pena mencionar, en lo que concierne al aspecto económico que rodea a la energía renovable en Colombia. Por un lado, se lanzó un proyecto de asignación de un plan financiero nacional por un monto de 32 billones de dólares para proyectos de energía renovable, la renovación y expansión de la iluminación pública, proyectos de co-generación y generación propia (incentivando el nacimiento de los prosumidores) (Ministerio de Minas y Energía, 2016).

En este sentido, el Ministerio de Minas y Energía (MME) y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) anunciaron una línea de crédito especial con términos favorables para proyectos e inversiones. Por otro lado, el Ministerio de Minas y Energía y la Institución Nacional de Desarrollo Financiero (FIDENTER) firmaron un acuerdo en Octubre de 2016 para promover un programa que logre integrar las energías renovables (PER) dentro de la matriz eléctrica colombiana para apalancar el potencial con el que cuenta Colombia en este tema (Ministerio de Minas y Energía, 2016).

Este trabajo de investigación se centrará en la comunidad indígena Wayuu de la Guajira. Para objeto de la aplicación del modelo se analizará un entorno de viviendas tipo ranchería y que abarca un total 6.300 personas de esta etnia.

El Departamento Nacional de Estadística (DANE) estima que la población indígena de Colombia asciende a 1,500,000 personas lo que equivale al 3,4% de la población nacional. El grupo indígena que cuenta con mayor representación en Colombia son los Wayuus en la Guajira. Los Wayuus habitan en la península árida de la Guajira en la frontera Colombo-Venezolana y ocupan las costas localizadas en las riveras del Mar Caribe (International Work Group for Indigenous Affairs. Colombia, 2016). En esta región, solo el 45,1% de las viviendas localizadas en áreas rurales tienen acceso a la electricidad (International Work Group for Indigenous Affairs. Colombia, 2016).

Para esta comunidad las distancias y la accesibilidad son los mayores problemas para la conexión a la red de energía eléctrica. Esta situación genera altos costos para suplir una demanda de estas características. Muchas comunidades indígenas que habitan esta área están localizadas a una gran distancia de la red de transmisión y no tienen manera de acceder al suministro de energía eléctrica.

Para estas comunidades, el acceso a alimentación y agua potable son las principales problemáticas. Adicionalmente, otras situaciones suponen dificultades para estas comunidades y ponen a la población en riesgo: déficit de plantas de tratamiento de agua, almacenamiento de medicinas o aire

acondicionado. Bajo estas condiciones las personas son incapaces de desarrollar actividades como agricultura y pesca. Por ende, es difícil alcanzar una economía sostenible capaz de mantener a estas comunidades.

Sin embargo, las poblaciones indígenas constantemente se adaptan a las condiciones adversas descritas anteriormente para mejorar sus condiciones de vida con la ayuda de otras comunidades. Actualmente, existen pocas posibilidades de suplir electricidad a estas comunidades indígenas mediante el Sistema Interconectado Nacional (SIN). Dentro de los problemas que supone realizar dicha conexión se incluyen las largas distancias para conectar las líneas de transmisión de energía, problemas de mantenimiento de pequeñas unidades de generación, pocos usuarios por comunidad para realizar la inversión y/o pocos grupos de interés social que empujen la mejora de las condiciones actuales.

Algunas áreas remotas no cuentan con recursos suficientes que permitan generar energía proveniente de fuentes convencionales en el país como lo son la hidroelectricidad o fuentes térmicas. Por lo tanto, otras soluciones como las plantas de generación diésel han sido implementadas como la mejor fuente de solución a los problemas en el corto plazo. De cualquier manera, el alto costo de la generación mediante plantas diésel y el transporte de combustible que se requiere para el funcionamiento de estas elevan los precios de la electricidad, lo que hace que potenciales subsidios del gobierno no puedan cubrir el gasto. Adicionalmente, los generadores diésel no tienen una expectativa de vida útil muy alta y requieren constante mantenimiento para asegurar confiabilidad (Vides-Prado et al., 2018).

Por ende, es necesario repensar las alternativas de las que disponen las comunidades como la Wayuu, para generar y distribuir dentro de sus miembros el servicio de la electrificación. Es allí donde las microrredes cobran relevancia como una alternativa que ofrece una estructura técnica que está bien documentada como estado del arte como una solución para el tipo de dificultades que afrontan comunidades rurales alejadas de la red eléctrica convencional, lo que constituye la principal motivación de este trabajo final de maestría.

Este documento presenta un trabajo de investigación que servirá como guía para el desarrollo de investigaciones donde se requiera un análisis que permita además de involucrar el componente técnico cuando se implementen proyectos asociados con microrredes, profundizar en la caracterización de las comunidades que se beneficiarían de este tipo de tecnologías e implementar modelos que demuestren la viabilidad de este tipo de proyectos dada una comunidad rural colombiana específica, como los Wayuus cuyas condiciones fueron descritas a lo largo de este apartado.

Para alcanzar este objetivo, se realiza una introducción al tema, se describen los antecedentes de la temática y se presenta el marco teórico revisado. Dentro de la revisión de literatura se abordan cinco ejes temáticos transversales que contribuyen al objetivo del análisis de la propuesta: Proyectos de microrredes, energía sostenible y qué se debe analizar para asegurarla ante esta perspectiva; políticas gubernamentales alrededor del tema; cómo se presenta la aceptación de la comunidad ante estas iniciativas y la gran transición energética que puede conllevar este tipo de

proyectos. Se presentan los objetivos de la investigación, se define la metodología a implementar, la estructura del modelo aplicado y su implementación. Finalmente, se presenta la validación mediante análisis de sensibilidad, análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones para próximos trabajos de investigación.

2. Antecedentes

En este capítulo se presentan los antecedentes del entorno de desarrollo de las microrredes abarcando aspectos tecnológicos, sociales y de mercado. Asimismo, se incluye información concerniente a la problemática planteada en el Capítulo 1 del presente documento. Se presenta la delimitación del alcance del análisis de caso de aplicación de microrredes dentro de una comunidad colombiana que no tiene acceso al SIN.

Se espera que el tamaño de mercado para las microrredes crezca en más de 3.5 veces entre 2015 y 2020. A pesar de los beneficios y las positivas proyecciones de mercado de las microrredes, se han realizado pocas implementaciones reales hasta ahora y hay una falta de participación de empresas dedicadas a la prestación de servicios eléctricos.

Existen varias preocupaciones que limitan su participación en este tipo de proyectos. Por ejemplo, algunas empresas de servicios públicos piensan que sus ganancias corporativas se verían amenazadas por los proyectos de microrredes de sus clientes (Pacheco & Foreman, 2017). Las empresas de servicios públicos no pueden ver fácilmente los incentivos y las retribuciones atractivas fácilmente, y se preocupan por los impactos en la calidad de la energía suministrada por parte de las microrredes de sus clientes.

Ha habido grandes avances en el desarrollo de tecnologías más económicas y eficientes para aprovechar y optimizar el sistema de microrredes. Sin embargo, la mayoría de las investigaciones pasadas y actuales se han centrado principalmente en resolver los desafíos técnicos y pocas han abordado una dimensión adicional, el mercado de las microrredes, en el que se analizan las interacciones entre los actores de un proyecto de microrredes para comprender la complejidad técnica de las microrredes y proponer soluciones que beneficien a todos los actores (Pacheco & Foreman, 2017).

Existen entonces grandes desafíos para un futuro sistema de distribución basado en microrredes y enfocado a la comunidad, incluyendo la necesidad de nuevos modelos de negocios y planes operativos, el control jerárquico y robusto para enfrentar conductas dinámicas e inciertas en múltiples escalas de tiempo, así como una infraestructura de comunicación flexible, rápida y confiable (Wu, Ortmeier, & Li, 2016).

Es por lo anteriormente descrito, y sumando la novedad y evolución del concepto de microrred, que surge cierta ambigüedad y se hace necesario estandarizar los diferentes aspectos que definen a una microrred, comprender las barreras de su implementación e identificar qué factores son cruciales para la operación y el funcionamiento exitoso de este tipo de tecnologías (Soshinskaya, Crijns-Graus, Guerrero, & Vasquez, 2014).

Desde el punto de vista técnico, se han analizado diferentes alternativas que buscan viabilizar e implementar el uso de microrredes para aplicaciones dedicadas a solventar la necesidad de comunidades que se encuentran alejadas de las redes principales, conocidas en Colombia como Zonas No Interconectadas (ZNI) (UPME, 2015). El problema con este tipo de aplicaciones como lo

son las microrredes es que uno o más componentes clave de la sostenibilidad se ignoran en las etapas de planificación y desarrollo, lo que invariablemente da como resultado fallas en el sistema o una ejecución deficiente (Akinyele & Rayudu, 2016).

Los aspectos culturales y sociales de la energía y la tecnología se reflejan en la forma en que las comunidades reaccionan ante la introducción de energías renovables no convencionales, con aspectos locales, de propiedad, de confianza, simbólica, afectiva y discursiva que afectan el comportamiento de las personas en relación con la energía. Estos factores múltiples pueden conducir a conflictos inesperados si no se abordan adecuadamente. Los conflictos a pequeña escala pueden ser cuestiones complejas, pero también pueden manejarse con mayor facilidad debido a la dimensión del área a intervenir y al número reducido de partes interesadas.

Para lograr una comprensión profunda por parte de una comunidad a fin de prevenir conflictos, es cuestión de confianza. La confianza entre las partes interesadas, las instituciones y la sociedad permite que la comunidad trabaje de forma colectiva, consensuada y eficaz hacia un objetivo común. Una comunidad cohesiva ideal puede inscribirse en proyectos fuertemente participativos y cooperativos, mejorando sus niveles de capital social (Alvial-Palavicino, Garrido-Echeverría, Jiménez-Estévez, Reyes, & Palma-Behnke, 2011).

Hoy en día, se encuentra poco conocimiento científico social aplicado en el desarrollo de microrredes. El hecho de que los participantes en estas redes sean actores sociales ha sido poco atendido hasta ahora en la literatura técnica especializada. Esta situación, como lo ha demostrado la experiencia de aceptación social de las energías renovables, eventualmente se convertirá en un gran obstáculo: no habrá microrredes sostenibles mientras apenas haya actores dispuestos a formar parte de ellas.

La aparición de microrredes depende por completo de la cooperación social y de los resultados del comportamiento dentro de la nueva configuración. La literatura sobre microrredes está muy centrada en los aspectos tecnológicos y, en consecuencia, aborda poco las cuestiones de aceptación social por parte de todos los actores involucrados en el establecimiento de microrredes. Las experiencias con el despliegue de energías renovables revelan que ignorar este aspecto crea cuellos de botella en el desarrollo propio de estas tecnologías (Wolsink, 2012).

En conclusión, es necesario realizar un análisis donde sean tenidos en cuenta aspectos que aporten a la sostenibilidad de las alternativas de proyectos de microrredes y que tengan en cuenta la importancia de los actores principales: la comunidad. Por ello, se propone realizar una caracterización general de una comunidad en específico en Colombia que permita en primer lugar, proponer unas pautas básicas de caracterización, para posteriormente analizar el impacto de estas alternativas en la cotidianidad del grupo de personas bajo estudio a través un modelo desarrollado en la literatura, revisando la viabilidad de diversas alternativas de implementación de microrredes y definir finalmente cuál es la mejor estrategia a implementar teniendo en cuenta el entorno de los actores protagonistas de la gestión.

3. Marco Teórico

En este capítulo se presentan los conceptos teóricos y científicos que enmarcan el proceso de análisis y evaluación de alternativas que involucren proyectos relacionados con microrredes dentro de una comunidad. Son conceptos relacionados con el acceso a la electrificación, desarrollo sostenible, electrificación y desarrollo rural, conceptos básicos de microrredes y tecnologías y aplicaciones de microrredes en comunidades. Fácilmente puede interpretarse que estos conceptos surgen de contextos diferentes, sin embargo, todos encuentran un punto en común cuando se habla de alternativas que permitan el acceso a la electrificación de comunidades rurales alejadas del sistema interconectado tradicional. En este apartado también se hace mención del proceso de caracterización y análisis de sensibilidad de modelos, parte clave de esta propuesta de investigación.

3.1. Acceso a la electrificación

El acceso a la electrificación se define como toda aquella infraestructura necesaria para llegar a los hogares y cubrir las necesidades básicas de electricidad del mismo. La infraestructura tradicional, está constituida por una cadena productiva: generación, transporte, distribución y comercialización de la energía, construida y reglamentada con el objetivo de suplir las necesidades energéticas de las grandes poblaciones. Sin embargo, cabe resaltar que, para suplir las necesidades básicas de pequeñas comunidades, normalmente no es viable o simplemente no se requiere acceder a una infraestructura tan compleja como la descrita anteriormente. Basta con cumplir con las condiciones necesarias para suplir la demanda energética de un grupo familiar, que puede darse a través del uso de alternativas de energía renovables a menor escala o de forma distribuida, aspectos que serán discutidos más adelante en este capítulo.

La Agencia Internacional de Energía (IEA) estima que aproximadamente 1.100 millones de personas en el mundo, principalmente en el sur de Asia y el África subsahariana, aún carecen de una conexión a la electricidad (Vinci et al., 2017). Los países de América Latina y el Caribe han visto avances notables en los últimos 25 años. Al principio de la década de 1990, la mayoría de las poblaciones urbanas de la región ya tenían acceso a electricidad, y la mayor parte del progreso desde entonces ha ocurrido en zonas rurales, áreas donde la tasa de electrificación aumentó de 65% en 1990 a 87% en 2012 (Williams et al., 2015). Sin embargo, el crecimiento de la electrificación en áreas rurales no es tan acelerado como parece. En Colombia, por ejemplo, aunque se han realizado esfuerzos para la electrificación rural mediante la creación de fondos que apoyan la electrificación de estas áreas (FAZNI), aún no se alcanza la cobertura requerida para abastecer al 100% de la población (UPME, 2015), demostrando que el mayor reto para alcanzar la cobertura total del servicio de energía eléctrica se encuentra en las zonas rurales.

3.2. Desarrollo Sostenible

El desarrollo sostenible se concibe como la capacidad de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las capacidades de futuras generaciones, garantizando equilibrio en aspectos como

el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social (Departamento Nacional de Planeación, 2015).

Dentro de la agenda de desarrollo a 2030 para los países miembros de la ONU, se plantearon 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible que deben cumplir estos países para garantizar el crecimiento en equilibrio de sus economías. El lento crecimiento económico mundial, las desigualdades sociales y la degradación ambiental que son características ineludibles de nuestra realidad actual presentan desafíos sin precedentes para la comunidad internacional. La opción de continuar con los mismos patrones ya no es viable, lo que hace necesario transformar el paradigma de desarrollo tradicional para tomar un camino que lleve a los países al desarrollo sostenible, inclusivo y con visión de largo plazo. Es por esto que los 193 Estados Miembros de las Naciones Unidas, junto con actores de la sociedad civil, el sector académico y el sector privado establecieron una negociación abierta en la que se obtuvo como resultado la proclamación los 17 objetivos mencionados. Dichos objetivos de desarrollo sostenible comprenden desde poner fin a la pobreza en todas sus formas en todo el mundo, hasta el fortalecimiento de los medios de ejecución y revitalización de la Alianza por un mundo sostenible. Dentro de estos objetivos de desarrollo sostenible, el número 7 proclama: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos (Departamento Nacional de Planeación, 2015).

Es por ello que el tema de la electrificación rural cobra importancia en la agenda de desarrollo de cada país, pues la mayor brecha para alcanzar la totalidad de cobertura en muchos países, se presenta en estas zonas. En países como Colombia, el desarrollo se ve marcado por esta brecha de electrificación rural, que representa el 7,6 % de la población ubicada en estas zonas que no tiene acceso a la electricidad (Williams et al., 2015).

3.3. Electrificación y desarrollo rural sostenible

El acceso a la electricidad trae consigo grandes beneficios, entre los que se incluyen mayores oportunidades económicas, aumento de ingresos, mayor calidad de vida, acceso a la información, mejoras en los esquemas de salud y de educación, entre otros. La falta de electricidad en las comunidades rurales tiene un estrecho vínculo con las disparidades en el desarrollo regional de los países (Williams et al., 2015).

Por esto en la Agenda 2030 de la ONU en el objetivo 7 se establece que la energía es central para casi todos los grandes desafíos y oportunidades a los que hace frente el mundo actualmente. Ya sea para los empleos, la seguridad, el cambio climático, la producción de alimentos o para aumentar los ingresos, el acceso a la energía para todos es esencial. La energía sostenible es una oportunidad que transforma vidas y economías en el planeta. Específicamente en las estrategias asociadas a la consecución del objetivo 7, se establece lo siguiente:

- Garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos.
- Aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas.

- Duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética.
- Aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias.
- Ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo (Departamento Nacional de Planeación, 2015).

3.4. Microrredes

Una microrred es un sistema de energía controlable que consiste en fuentes de generación distribuidas (generalmente basadas en fuentes de energía renovables, como la solar), cargas, sistemas de almacenamiento de energía y operaciones descentralizadas de redes eléctricas. Los escenarios típicos de aplicación cubren áreas tales como comunidades, escuelas, edificios comerciales y fábricas industriales. La mayoría de la generación distribuida en microrredes utiliza energías renovables como energía primaria, lo que permite mejorar la proporción del consumo de energía renovable y reducir las emisiones de CO₂ (Chen & Wei, 2018).

Las microrredes ofrecen una solución efectiva al permitir cargas de alto valor para asegurar niveles mucho más altos de calidad y confiabilidad sin aumentar, y potencialmente reducir, los costos de la electricidad para las personas que decidan aplicar estas tecnologías (Marnay, 2016).

La naturaleza descentralizada de los microrredes representa una alternativa ventajosa sobre la infraestructura centralizada tradicional. Estas ventajas incluyen mejoras en la economía, rendimiento ambiental, sostenibilidad ambiental y equidad regional. En el contexto de la electrificación rural, en muchos países, el alcance de la red eléctrica es extremadamente limitado y casi exclusivamente atiende zonas urbanas (Williams et al., 2015).

Sin duda alguna, el primer paso para una implementación exitosa de este tipo de tecnologías, es que ésta debe lograrse gradualmente, para lo cual es necesario trabajar en tres áreas: capacitación, investigación e implementación. Además, es esencial formular un programa para el desarrollo de fuentes de energía renovables, que permita la diversificación de la matriz energética, presentando más opciones de suministro para el futuro (Gaona, Trujillo, & Guacaneme, 2015).

3.5. Tecnologías y aplicaciones de microrredes en comunidades

Muchos países en vía de desarrollo tienen la oportunidad de apalancar décadas de avances tecnológicos en la medida en que desarrollan sistemas innovadores de infraestructura moderna y aprovechan la experiencia y lecciones aprendidas de sus referentes. Las microrredes tienen la habilidad de operar de manera flexible, lo que las hace jugar un papel fundamental en el desarrollo

de infraestructura eléctrica construida alrededor de tecnologías renovables descentralizadas. Las microrredes pueden acelerar el acceso a la electricidad y en la medida en la que se desarrollan, también permiten afrontar perspectivas de interconexión entre ellas, creando una red descentralizada que puede agregar cargas y capacidad de generación de forma equilibrada. Muchas naciones desarrolladas están dedicando ahora recursos significativos para mejorar la infraestructura eléctrica actual y permitir la integración de tecnologías descentralizadas, como lo son las microrredes (Williams et al., 2015).

Desde el punto de vista técnico se han analizado diferentes alternativas que buscan viabilizar e implementar el uso de Microrredes para aplicaciones dedicadas a solventar la necesidad de comunidades que se encuentran alejadas de las redes principales, conocidas en Colombia como Zonas No Interconectadas (ZNI) (UPME, 2015). Dentro de las propuestas presentadas se encuentran mejorar la robustez y fiabilidad de fuentes de alimentación de microrredes e implementar sistemas de calidad y confiabilidad de energía heterogénea (HePQR), es decir, la posibilidad de entregar calidades de potencia diferenciadas a las cargas con el fin de satisfacer sus necesidades individuales más de cerca que el servicio universal homogéneo (HoPQR) (Marnay, 2016), la adopción de unidades de cogeneración para la alimentación de microrredes (Milis, Peremans, & Van Passel, 2018), el desarrollo de diferentes topologías como microrredes de corriente alterna y baja tensión (ACLV), microrredes de corriente continua de baja tensión (DCLV) y topología híbrida que incluye alimentador ACLV y DCLV de microrredes con configuración de inversor centralizado o descentralizado (Sivarasu, Chandira Sekaran, & Karthik, 2015), entre otras. De los estudios analizados se encuentra una alta tendencia a resolver toda la implementación técnica de las microrredes, dando a entender que este tipo de aplicaciones se encuentran en una fase inicial y que se requiere profundizar en los temas transversales que faciliten su proliferación, con enfoque social dentro de una comunidad.

3.6. Caracterización y análisis de sensibilidad de modelos con enfoque social

Desde una perspectiva investigativa la caracterización es una fase descriptiva con fines de identificación, entre otros aspectos, de los componentes, acontecimientos (cronología e hitos), actores, procesos y contexto de una experiencia, un hecho o un proceso (Sanchez Upegui, 2010).

La caracterización es un tipo de descripción cualitativa que puede recurrir a datos o a lo cuantitativo con el fin de profundizar el conocimiento sobre algo. Para cualificar ese algo previamente se deben identificar y organizar los datos; y a partir de ellos, describir (caracterizar) de una forma estructurada; y posteriormente, establecer su significado (sistematizar de forma crítica) (Bonilla Castro E., 2009). Además, la caracterización es una descripción u ordenamiento conceptual (Bello, 2012), que se hace desde la perspectiva de la persona que la realiza. Esta actividad de caracterizar (que puede ser una primera fase en la sistematización de experiencias) parte de un trabajo de indagación documental del pasado y del presente de un fenómeno, y en lo posible está exenta de interpretaciones, pues su fin es esencialmente descriptivo (Sanchez Upegui, 2010).

Esta caracterización será el hito, una vez se realice la fase de recolección de datos de la presente propuesta de investigación y que permitirá entender de manera global el funcionamiento de una comunidad donde se aplicaría una alternativa de implementación de proyectos relacionados con microrredes. Asimismo, será necesario una vez identificado el modelo a implementar, realizar un análisis de sensibilidad a los resultados que presente el mismo. Este análisis de sensibilidad se realizará identificando las variables que afectan los posibles resultados y para cada una de ellas, se establecerán escenarios fundamentados y que permitan analizar el impacto de cada una de ellas dentro del modelo.

Un análisis de sensibilidad es una técnica analítica que intenta determinar el resultado de los cambios en los parámetros de las actividades en un proceso o modelo. Esta es una medida de la sensibilidad de algo a un cambio dado. Mide el impacto hipotético de los diferentes tipos de cambio en el proceso general o modelo a implementar, el flujo de actividad, y es útil para determinar cómo un cambio puede afectar la operación. Asimismo, se utiliza para apoyar la toma de decisión o el desarrollo de recomendaciones para los tomadores de decisiones basadas en variables en el modelo analítico. También se llama prueba de hipótesis, y el objetivo es probar los resultados mensurables de rendimiento de diferentes maneras para lograr los objetivos deseados (Moore, Benedict, Bilodeau, & Vitkus, 2013).

La combinación de dicha caracterización y el análisis de sensibilidad permitirán definir la mejor alternativa de implementación de electrificación para la comunidad específica de análisis.

El marco teórico presentado permite entender la interrelación de conceptos de acceso a la electrificación, desarrollo sostenible y rural y microrredes, además de introducir conceptos metodológicos que permitirán establecer alternativas de implementación de tecnologías de redes inteligentes como las microrredes, como alternativa tangible de electrificación para una comunidad alejada de los sistemas interconectados tradicionales. Se incorporarán también, aspectos de desarrollo de proyectos que son transversales y de fundamental importancia para su aplicación. Dichos componentes transversales, se analizarán en el apartado siguiente de revisión de literatura.

4. Revisión de literatura

En este apartado se presenta la revisión de literatura técnica especializada, donde se busca abarcar los aspectos de los proyectos de microrredes que inciden en su aplicación y que son transversales entre el aspecto técnico y social: energía sostenible, políticas gubernamentales, aceptación de la comunidad y transición energética.

4.1. Energía Sostenible

La introducción de nuevas tecnologías es necesariamente una transformación social y cultural que implica la adaptación a un nuevo contexto, co-creado por la interacción entre los intervenidos y los interventores. Las tecnologías sostenibles deberían estar orientadas a preservar las funciones básicas de los sistemas socio-ecológicos al tiempo que limitan la evolución de prácticas insostenibles, como es el caso de las fuentes de energía renovables no convencionales (Alvial-Palavicino et al., 2011).

La contribución de la energía, y particularmente de la eléctrica, en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenibles del Milenio del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo ha quedado ampliamente demostrada (Departamento Nacional de Planeación, 2015). Entre otros beneficios, el acceso a la electricidad ayuda a reducir problemas visuales y las enfermedades pulmonares (causadas por el humo de las lámparas de kerosene y velas), extiende las horas productivas diarias, permite a los niños estudiar durante la noche y obtener una mejor educación mediante el uso de nuevas tecnologías en escuelas, aumenta el acceso a los medios de comunicación y mejora los centros de salud mediante el uso de dispositivos médicos o la refrigeración de vacunas (Domenech, Ranaboldo, Ferrer-Martí, Pastor, & Flynn, 2018).

Ampliar el uso de microrredes puede proporcionar una gama más diversa de opciones de financiamiento para países y naciones que buscan abordar sus vulnerabilidades climáticas de forma inmediata, pero que están limitadas de forma capital. Las microrredes proporcionan un área más útil, y tal vez más atractiva, para inversiones sostenibles cuando se considera su potencial para conectar sus potenciales objetivos sociales y ambientales con un retorno de la inversión (Kelly-Pitou et al., 2017).

Ya entrando en los detalles de aplicación de microrredes, el tipo específico de función que aborda una microrred generalmente se deja al diseño de ingenieros electricistas que son capaces de desarrollar algoritmos de optimización de forma exclusiva dependiendo de la intención detrás del diseño de la microrred. Si los planificadores urbanos, por ejemplo, tuvieran que ordenar lo que las microrredes deberían ayudar a hacer en la sociedad, el diseño inherente de la microrred sería uno que refleje consideraciones ambientales más fuertes (Kelly-Pitou et al., 2017).

4.2. Políticas Gubernamentales

Una red inteligente es una red socio técnica caracterizada por la gestión activa de la información y los flujos de energía, con el fin controlar las prácticas de generación distribuida, almacenamiento,

consumo y demanda flexible. Siguiendo esta perspectiva socio técnica, tales sistemas de infraestructura deberían verse como combinaciones de ciertos elementos técnicos y características que son necesarias para hacer que la tecnología sea activa. Estas características son 'patrones de prácticas sociales y pensamiento', que por definición se llaman 'instituciones'. "Las instituciones se componen de elementos normativos que, junto con las actividades y los recursos asociados, proporcionan estabilidad y sentido a la vida social". Para viabilizar el uso de microrredes, dentro de estas nuevas alternativas de provisión de energía se resaltan cinco categorías de instituciones:

- Políticas gubernamentales: intervenciones, marcos legales, gobierno
- Organización en departamentos, ministerios y agencias
- Tecnologías dominantes
- Rutinas y relaciones organizacionales
- Estándares de la industria y especializaciones
- Expectativas y preferencias de la sociedad

Los sistemas actuales de suministro de energía están altamente institucionalizados; regidos por tales regulaciones, normas y patrones de pensamiento definidos social y culturalmente. Desafortunadamente, estos no han sido desarrollados con un enfoque distributivo (Wolsink, 2012).

Paradójicamente, las microrredes se han convertido en un término de moda, que también se ha adaptado en los círculos políticos y se consideran una respuesta a muchos problemas relacionados con el aumento del consumo de energía como los picos de carga. Sin embargo, se carece de la visión adecuada sobre los cambios institucionales necesarios para convertir estas promesas en realidad. Por un lado, existen grandes expectativas sobre las redes inteligentes y, por otro lado, existe una completa falta de comprensión de la necesidad del cambio institucional requerido para establecerlas. Las expectativas poco realistas, especialmente la creencia de que las microrredes reducirán las facturas de electricidad, eventualmente llevarán a la decepción y crearán desconfianza (Wolsink, 2012).

Es fundamental para las autoridades normativas comenzar a identificar cómo las decisiones que se toman hoy también pueden ayudar a abordar los objetivos necesarios para el mañana. Adoptar un enfoque más dinámico ayudará a los ingenieros, economistas y demás expertos a diseñar sus sistemas de maneras que respalden los objetivos de desarrollo de una comunidad. Hacerlo ayudará a garantizar que las microrredes mismas puedan actuar como parte de un sistema dentro de un sistema existente. Al establecer un marco que priorice el desarrollo de microrredes como parte de una estrategia de resiliencia, los planificadores urbanos pueden ayudar a proteger sus propias comunidades sin tener que usar sus propios medios financieros para hacerlo. Las microrredes como parte de una estrategia de resiliencia proporcionan un valor sistémico a una variedad de partes interesadas dentro de entornos tanto urbanos como rurales (Kelly-Pitou et al., 2017).

Otras barreras que enfrentan las microrredes desde el punto de vista institucional tienen un enfoque financiero como lo son la falta de alternativas de financiación, la capacidad de compra de las comunidades a las que se busca llegar, invasiones existentes de red, seguridad de ingresos y la recaudación de los mismos. Algunas de las intervenciones a estas barreras incluyen garantías de

préstamo, garantías parciales de riesgo, préstamos preferenciales, subsidios públicos, reducciones de impuestos, concesiones de servicios públicos, tarifas basadas en servicios fijos, métricas de pre-pago y pagos a través de internet (Williams et al., 2015).

Está muy claro que aún a nivel global, se evidencian oportunidades de mejora en la participación del gobierno y su influencia en la masificación de las microrredes y las respectivas políticas apropiadas que respalden su desarrollo. Dichas oportunidades se centran en la creación de normativas efectivas que apoyen las alternativas técnicas con beneficio social. Asimismo, existen grandes retos para reguladores pues aún no es posible establecer un mapa de ruta que abarque todos los posibles escenarios y tecnologías asociadas a estas microrredes.

4.3. Aceptación de la Comunidad

Una transformación en el sistema de producción de energía es un proceso complejo que abarca un amplio conjunto de aspectos. La capacidad de cambiar de dichas comunidades depende de la forma en que se ha concebido históricamente y las prácticas e instituciones que han surgido como consecuencia. Esta transformación implica cambios no solo en la tecnología, sino también en elementos tales como las prácticas, las regulaciones, la industria, la infraestructura y el significado simbólico de los usuarios.

La introducción de un esquema de generación distribuida y de conexión a una microrred requiere un cambio en el paradigma de producción de energía; es decir, no solo en los roles técnicos, sociales, culturales y la percepción de los sistemas de energía. Estos cambios no pueden abordarse simplemente refiriéndose a "los hechos" ya que las actitudes públicas son complejas y de naturaleza multidimensional (Alvial-Palavicino et al., 2011).

El despliegue de energías renovables enfrenta muchos problemas relacionados con la aceptación social. En el concepto de aceptación social de las innovaciones de energía renovable se distinguen tres dimensiones: (1) la aceptación sociopolítica, se refiere a la aceptación de decisiones sobre el marco institucional; este marco puede a su vez crear condiciones favorables o impedir la aceptación en las otras dos dimensiones: (2) aceptación de la comunidad y (3) aceptación del mercado (Wolsink, 2012). En la Figura 4-1 se observa en el mapeo de estas tres dimensiones.

La criticidad de los consumidores en el proceso de transformación de los sistemas de energía ofrece oportunidades para empoderar a las comunidades, a través de la educación, la capacitación y proporcionando vías para la organización social en torno a las preocupaciones relacionadas con la energía y conceptos. Estos pasos requieren la desmercantilización de la energía y la institucionalización de la participación del consumidor en la generación y gestión local de energía (Adil & Ko, 2016).



Figura 4-1. Tres dimensiones del concepto de aceptación social de las innovaciones de energía renovable como lo son las Microrredes.
Fuente: (Wolsink, 2012)

4.4. Transición Energética

Vivimos en una era urbana, el 54% de la población mundial vive en ciudades y está previsto que este valor crezca al 66% en 2050. Por un lado, este crecimiento urbano brinda grandes oportunidades, porque las ciudades pueden actuar como centros de conocimiento e innovación, generando empresas y empleos, y como foco para crear economías de escala en el despliegue de nuevas tecnologías. El trabajo sobre innovación energética en el gobierno y la industria ocurre en el vacío con poca o ninguna atención a los procesos socio-técnicos más amplios en el trabajo. Trabajos recientes de Price Waterhouse Cooper han identificado ocho 'tecnologías de energía disruptiva' que incluyen vehículos eléctricos, generación distribuida y microrredes, pero nuevamente se hace poco o ningún intento de posicionarlas dentro de un contexto socio-técnico específico, aunque se implementan escenarios. Esto requiere la creación de visiones específicas de cada ciudad, que reconozcan el contexto socio-técnico de las tecnologías disruptivas (Dixon, Lannon, & Eames, 2018).

Según el Banco Mundial, 1,6 millones de personas en los países en desarrollo no tienen acceso a la electricidad. Anticipando el futuro, predijeron que una gran parte de esta población carecería de servicios de electricidad si continúan las mismas tendencias que existen ahora en términos de distribución de electricidad. Sin embargo, admitir que existe un vínculo entre el acceso a servicios de energía y la mejora de las condiciones de vida, implica que los países deben esperar mucho tiempo antes de una mejora de dichas condiciones. Entonces, uno de los principales desafíos a los que se enfrentan los países en desarrollo se pueden resumir en dos puntos:

- ¿Cómo podrían aumentar el acceso a la electricidad, especialmente en las zonas rurales remotas?

- ¿Qué programa de electrificación se debería elegir? (Thiam, 2010)

En este orden de ideas es necesario una transición. Los sistemas energéticos se han desarrollado históricamente como grandes sistemas técnicos, caracterizados, especialmente en América Latina, por plantas de generación de gran capacidad distantes de las áreas de consumo. Este paradigma dominante actualmente está cambiando a sistemas energéticos más flexibles, como sistemas inteligentes de microgeneración que pueden desarrollarse a nivel comunitario e involucrar activamente a los usuarios en la producción y gestión de energía (Alvial-Palavicino et al., 2011).

Dentro de este proceso de transición existen ideas, en cuanto al componente técnico se refiere, que se puede decir que se encuentran definidas y es allí donde se ven enmarcadas las microrredes como desarrollo. Sin embargo, como ya se ha analizado en apartados anteriores, aún sigue existiendo gran zozobra en cuanto a la definición de las variables del entorno, sobretodo en el involucramiento de consignas sociales. Sin duda alguna diferentes alternativas han empezado a tomar fuerza para reforzar este aspecto. Por ejemplo, la democracia energética es un movimiento social emergente que promueve las transiciones de energía renovable al resistir la agenda energética dominante en el uso de combustibles fósiles, al mismo tiempo que reclama y reestructura los regímenes energéticos democráticamente. Al integrar el cambio tecnológico con el potencial de cambio socioeconómico y político, el movimiento vincula la justicia social y la equidad con la innovación energética. La transición de los sistemas energéticos dominados por el combustible fósil a una energía más renovable abre una oportunidad para el cambio de las tecnologías y el cambio de las dinámicas sociales y políticas a través del realineamiento democrático de estos sistemas sociotécnicos. La democracia energética proporciona un conjunto de objetivos e instrumentos de política para resistir el régimen energético dominante mientras se reclaman y se reestructuran democráticamente los sistemas, sectores e instituciones energéticas (Burke & Stephens, 2018).

Como ejemplo de alternativas viables hacia esta transición energética en Colombia, y que ya están siendo implementadas en el departamento de la Guajira se encuentra el proyecto de la compañía Kingo (Kingo, 2019). Sus soluciones tienen foco en comunidades alejadas del suministro de redes tradicionales de energía permitiendo en comunidades alrededor del mundo el acceso a energías limpias y al desarrollo consecuente de este tipo de soluciones. Los sistemas de energía inteligente que proveen tienen aplicaciones en iluminación y acceso a puntos de conexión para dispositivos electrónicos y electrodomésticos y cuentan con alternativas comerciales para el pago de energía diaria, semanal o mensual de acuerdo a la necesidad de sus clientes. Ellos también pueden solicitar gratis instalaciones de sistemas y sus respectivas actualizaciones (Kingo, 2019). Esto constituye una solución efectiva e integral para las comunidades de las Zonas No Interconectadas de nuestro país.

Es posible concluir, que la implementación de alternativas de electrificación para zonas rurales no interconectadas conlleva una transformación profunda en términos culturales y de comunidad, que van atadas a la aceptación de los agentes sociales que formarán parte activa de las alternativas de proyectos de implementación de microrredes y que sin duda van atadas del apoyo de políticas gubernamentales sustentadas en desarrollo sostenible de dichas comunidades, como eje principal de actuación. El llamado se encuentra entonces en presentar una caracterización proveniente de

una buena lectura de una comunidad y la evaluación de alternativas de aplicación para la misma, como bien fue implementado por la compañía Kingo (Kingo, 2019) y los trabajos académicos que serán descritos en el siguiente capítulo.

4.5. Trabajos Previos

Este problema ha sido modelado en varios trabajos de investigación previos dentro de los que se encuentran *“Contribución de la Energía al Desarrollo de Comunidades Aisladas No Interconectadas: Un Caso de Aplicación de la Dinámica de Sistemas y los Medios de Vida Sostenibles en el Suroccidente Colombiano”* (Franco, C., Dyner, I., & Hoyos, 2008). En este artículo se utiliza la dinámica sistemas para la simulación y evaluación de políticas energéticas para un caso de aplicación en las comunidades indígenas del municipio de Jambaló en el departamento del Cauca, Colombia.

Asimismo en el trabajo *“La Energía como una Herramienta para el Desarrollo Sostenible en las Zonas Rurales Aisladas”*, es posible identificar mediante la dinámica de sistemas un modelo que tenga en cuenta la necesidad de relacionar una comunidad como centro de coordinación para el desarrollo rural en la región, integrado por todas las comunidades adyacentes, que, directa o indirectamente se ven afectados por las consecuencias de la aplicación de la tecnología de la energía en la comunidad con las mejores características físicas para su aplicación. (Ceballos, F., Arango, S., Dyner, 2009).

Y finalmente, en el trabajo en desarrollo *“Alternativas de gestión para el suministro eléctrico sostenible en zonas no interconectadas”* (Garcés Arango, 2019), se aprecia la integración holística y desarrollada a través de la metodología de dinámica de sistemas, de todos los aspectos necesarios que conlleva la implementación de una solución tipo microrred en una comunidad perteneciente a las Zonas No Interconectadas –ZNI-, y es el modelo bajo el cual se basa la parametrización y la identificación de alternativas de este trabajo de investigación.

5. Objetivos

En este capítulo se presenta el objetivo general del trabajo final de maestría y los objetivos específicos que contribuirán a la consecución del objeto de investigación.

5.1. Objetivo General

Evaluar el impacto de un proyecto de microrredes en una comunidad colombiana determinada.

5.2. Objetivos Específicos

1. Caracterizar una comunidad colombiana en términos económicos y socio-culturales.
2. Parametrizar un modelo de simulación existente que permita evaluar el impacto de un proyecto de microrredes en una comunidad colombiana determinada.
3. Identificar alternativas para la implementación de proyectos de microrredes en una comunidad colombiana determinada.

6. Metodología

En este capítulo se presenta la metodología implementada en el trabajo final de maestría y que permitió dar solución a los objetivos del presente trabajo investigativo. Es importante resaltar que el modelo implementado se construyó en el marco del concepto de dinámica de sistemas. Este método fue desarrollado por primera vez por el Profesor J.W.Forrester del MIT en 1950 para analizar comportamientos complejos en ciencias sociales, especialmente en asuntos de gestión, a través de simulaciones computarizadas.

El proceso de construcción del modelo comienza con la articulación del problema para determinar las fronteras del sistema. Luego, se determinan las variables determinantes del sistema conectándolas a través de flechas que llevan a la construcción de los diagramas causales. Estas flechas muestran la dirección de la influencia mientras que la polaridad que las acompaña ilustra el efecto de influencia, positivo para influencia directa y negativo para influencia inversa.

Posteriormente, se desarrolla la formulación matemática dentro del diagrama de flujos, para pasar al proceso de simulación seguido de etapas de pruebas. La etapa final de la metodología consiste en establecer escenarios y desarrollar análisis de sensibilidad. En el contexto eléctrico, por ejemplo, el proceso de toma de decisiones asociadas a la planeación y a la gestión es altamente complejo y se ha convertido en un reto para inversionistas y desarrolladores de políticas, debido a las incertidumbres de este sector. Algunas de estas incertidumbres incluyen la planificación de fuentes de generación (renovable y no renovable), demoras en procesos constructivos de infraestructura eléctrica, limitación de recursos, selección de tecnologías, fluctuaciones de precio y demanda y limitaciones regulatorias. Es por esto, que el sector eléctrico y energético es dinámico por naturaleza. El proceso de toma de decisiones se vuelve más complejo incluso cuando se consideran las características competitivas del mercado eléctrico (Ahmad, Mat, Muhammad-sukki, & Bakar, 2016).

Este es el motivo de selección de esta aproximación para dar respuesta y una posible solución a la problemática planteada en este trabajo de investigación y que permita a partir del caso de estudio analizado determinar una alternativa viable de energización a través de microrredes a la comunidad seleccionada.

6.1. Descripción del caso de estudio

Como se describió en la introducción de este documento, el grupo indígena que cuenta con mayor representación en Colombia son los Wayuus en la Guajira. En esta región, solo el 45,1% de las viviendas localizadas en áreas rurales tienen acceso a la electricidad (International Work Group for Indigenous Affairs. Colombia, 2016) y existe una muy baja probabilidad de suplir electricidad a estas comunidades indígenas mediante el Sistema Interconectado Nacional (SIN). Por lo tanto, estas comunidades han optado por otras soluciones como las plantas de generación diésel como la mejor solución en el corto plazo. De cualquier manera, el alto costo de la generación mediante plantas diésel y el transporte de combustible que se requiere para su funcionamiento eleva los precios de

la electricidad, lo que hace que potenciales subsidios del gobierno no puedan cubrir el gasto. Adicionalmente, los generadores diésel no tienen una expectativa de vida útil muy alta y requieren constante mantenimiento para asegurar confiabilidad (Vides-Prado et al., 2018).

Por ende, es necesario repensar las alternativas de las que disponen las comunidades como la Wayuu, para generar y distribuir dentro de sus miembros el servicio de la electrificación. Es allí donde las microrredes cobran relevancia como una solución para el tipo de dificultades que afrontan comunidades rurales alejadas de la red eléctrica convencional.

Para reducir el marco de análisis de este caso de estudio, se toma como comunidad efectiva la población Wayuu residente en el municipio de Maicao, La Guajira, en donde se asientan 66 comunidades de esta etnia. Esta población equivale al 17% del total de la población Wayuu del territorio nacional y está constituida por 37.340 personas, dispersas por todo el municipio (Vides-Prado et al., 2018). Para objeto de la aplicación del modelo se analizará un entorno de viviendas tipo ranchería y que abarca un total 6.300 personas, comunidad que cuenta con fácil acceso mediante vías destapadas, capacidad de organización y cooperación y cercanía a la cabecera municipal de Maicao. Es importante mencionar que las principales actividades económicas de esta comunidad se centran en la agricultura de cultivos como los de tomate, ají, frijol, maíz, yuca, patilla, melón y ahuyama, la ganadería ovina y caprina y la pesca principalmente de tilapia (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2015).

Realizando un equivalente basado en el trabajo de Vides et. al, el total de viviendas analizadas o rancherías para estas 6.300 personas asciende al valor de 1.235 viviendas, valor que se encuentra acorde al valor estimado por el DANE en su censo de 2005, donde el promedio de personas por vivienda en la Guajira es de 5.1 personas (DANE, 2005). La dinámica poblacional de esta comunidad, basados en la proyección del informe de cambios demográficos del DANE, está definida acorde a la Tabla 6-1.

Tabla 6-1. Dinámica poblacional de caso de estudio.

Población	Nacimientos	Muertes	Migrantes
6300	113,526	37,422	7,182

Fuente: Elaboración propia a partir de (DANE, Morales & Cifuentes, 2007).

Para efectos de este trabajo de investigación la dinámica productiva de la comunidad no determina su consumo energético, que está caracterizado por un componente altamente residencial.

A continuación, se realiza en detalle descripción del modelo a implementar para analizar el caso de estudio descrito anteriormente.

6.2. Descripción del modelo

6.2.1. Descripción de la estructura del modelo

El modelo implementado dentro de este trabajo de investigación y el cual será aplicado al caso de estudio descrito en el apartado anterior, proviene de la tesis doctoral en desarrollo “*Alternativas de gestión para el suministro eléctrico sostenible en zonas no interconectadas*” tesis en proceso de elaboración por Estefany Garcés Arango (Garcés Arango, 2019).

Este modelo se encuentra enmarcado en la alternativa de análisis de dinámica de sistemas y se encuentra soportado en la herramienta Powersim, que permite modelar y simular sistemas que cambian en el tiempo a través de ciclos de realimentación. Puede ser utilizado para estudiar el progreso continuo del sistema en el tiempo en un gran número de áreas, por ejemplo, economía, física y energía.

El modelado se realiza construyendo un diagrama de niveles y flujos que permite dimensionar la interacción de todos los actores que intervienen dentro del caso de estudio. La implementación de Powersim se basa en la “analogía de la bañera”, la bañera representa el área objetivo, el grifo es la fuente de riqueza o recursos que entran en el sistema, el drenaje es la riqueza o recursos que salen del sistema. En pocas palabras, el sistema tiene éxito cuando aumenta el nivel de agua en la bañera. Cuando la riqueza y los recursos del sistema se exportan más rápido o más frecuentemente que la riqueza y los recursos se importan, el nivel del agua cae y el sistema es susceptible a falla (Karlsson & Persson, 1998).

El modelo, se encuentra estructurado por tres (3) módulos centrales: Módulo de Usos y Demandas, Módulo de Potencia y Energía y Módulo de Recaudos y Generación. Todos analizados inicialmente a través de hipótesis dinámicas y diagramas de niveles y flujos, consolidados y relacionados entre sí a través de Powersim, y construido para este análisis dentro una ventana de 30 años (vida útil de la microrred). A continuación, se describen cada uno de estos módulos, así como la información que se espera suministre el modelo. La descripción a través del diagrama causal general puede apreciarse en la Figura 6-1.

a. Módulo Usos y Demandas

En este módulo se incluyen todas aquellas actividades que desarrolla la población y que pueden impactar la demanda eléctrica (actividades productivas, educativas, de creación y recreación) así como la misma demanda residencial de las viviendas del caso de estudio ver Figura 6-1 y Figura 6-2. Se analiza el impacto en demanda pico para determinar un costo de instalación para la tecnología de generación y a su vez el potencial del uso eficiente en el tiempo de esta energía.

Cabe resaltar que dentro de este módulo se realiza una hipótesis de crecimiento basada en la información de nacimientos, muertes y migraciones de la población del caso de estudio.

b. Módulo Potencia y Energía

En este módulo se enlaza esa demanda pico asociada a las actividades de la comunidad descrita en el módulo anterior con el margen de potencia requerido para el desarrollo de estas y cómo la capacidad instalada requerida debe conformarse para traducirse en capacidad instalada solar y de baterías, así como la integración con capacidades instaladas previas de la comunidad como plantas diésel, ver Figura 6-1 y Figura 6-3. En este apartado se considera una radiación promedio anual diaria de la comunidad del caso de estudio.

c. Módulo Recaudos y Generación

En este apartado del modelo se incorporan los parámetros financieros requeridos para la operación del sistema de la microrred. Dentro de estas consideraciones se incluye la tarifa, la realización de recaudo, los subsidios que puede presentar la comunidad del caso de estudio y los gastos de Administración, Operación y Mantenimiento (AOM) de la generación asociada al funcionamiento de la microrred, ver Figura 6-1 y Figura 6-4. Es necesario tener en cuenta que dentro de esta interacción se tiene como variable externa la necesidad de ahorro para la reposición de baterías e instalación gradual de nuevas capacidades de generación solar, con todos los elementos que ello requiere.

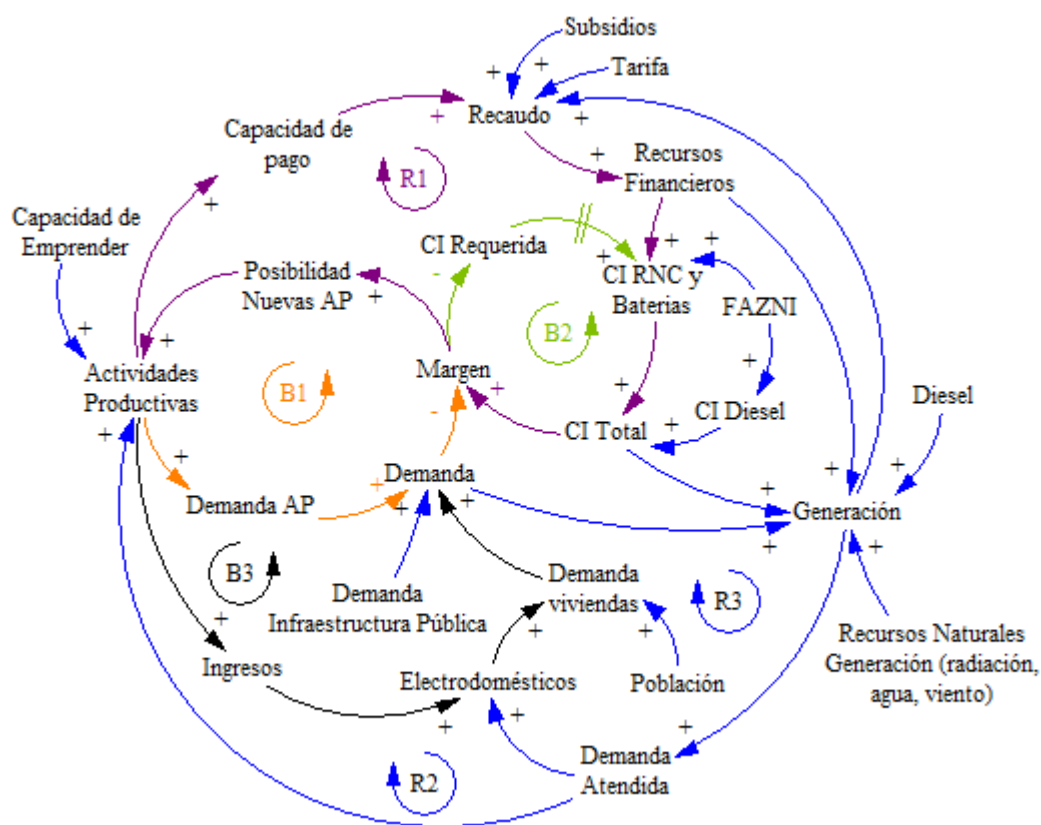


Figura 6-1. Hipótesis dinámica – Diagrama Causal General
Fuente: (Garcés Arango, 2019)

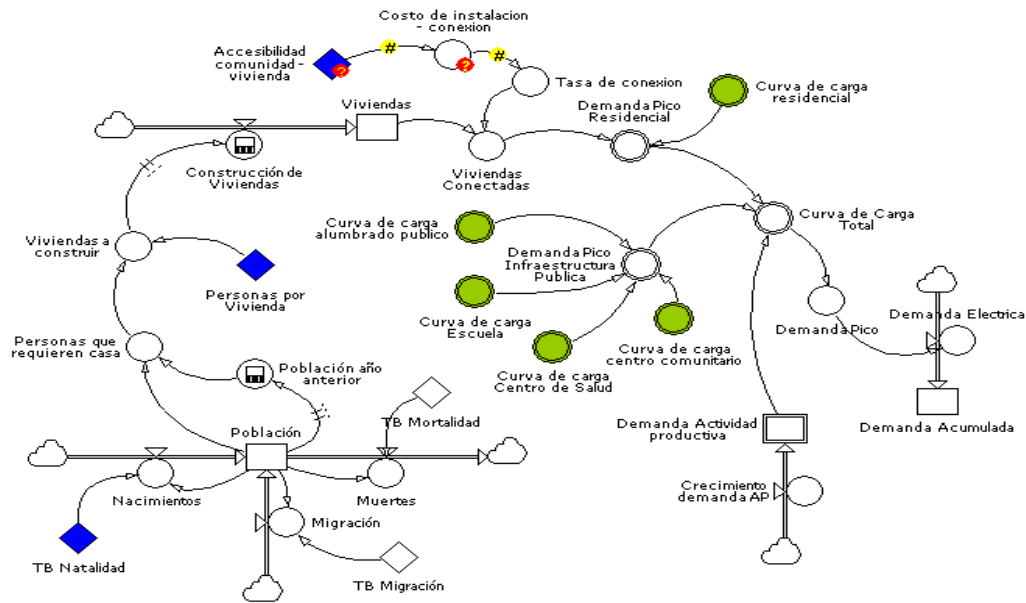


Figura 6-2. Diagrama de niveles y flujos: módulo usos y demanda.
 Fuente: (Garcés Arango, 2019)

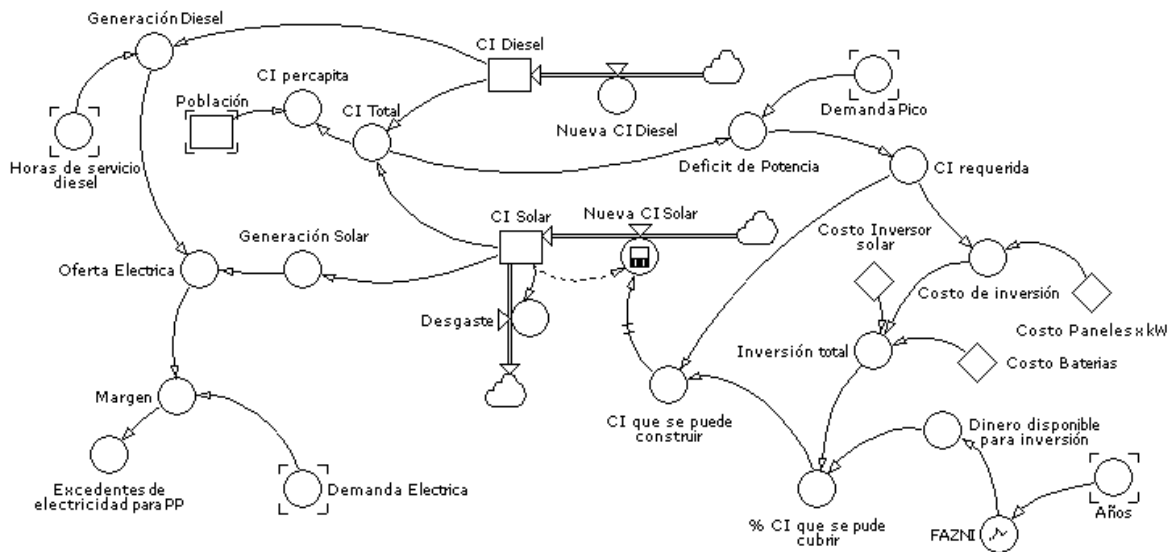


Figura 6-3. Diagrama de niveles y flujos: módulo potencia y energía.
 Fuente: (Garcés Arango, 2019)

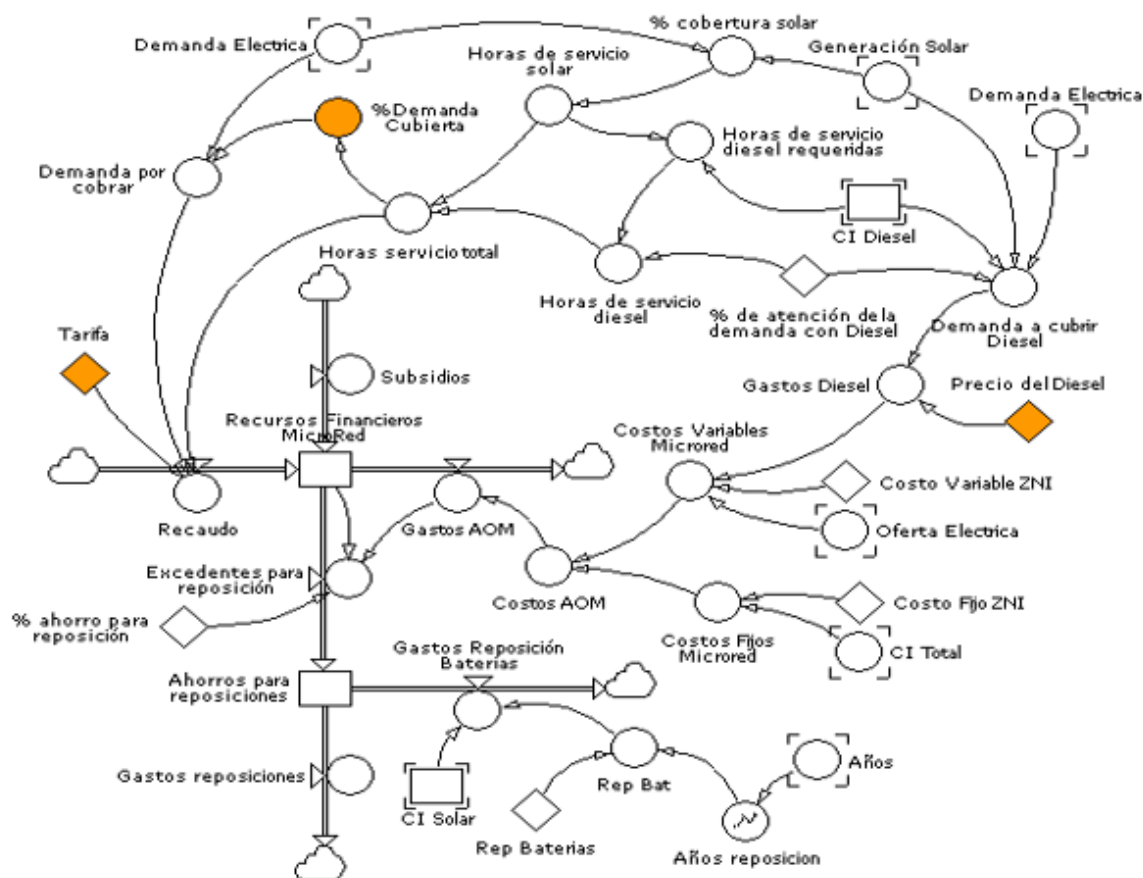


Figura 6-4. Diagrama de niveles y flujos: módulo recaudos y generación.
 Fuente: (Garcés Arango, 2019)

d. Información que suministra el modelo

Una vez ingresada la información que requieren las variables de cada uno de los módulos o apartados del modelo, se espera que el mismo suministre información de valor y establezca una guía en temas como: sostenibilidad ambiental de la alternativa de implementación del caso de estudio, estableciendo el porcentaje de energía renovable o no renovable incorporada en el mismo, márgenes de prestación traducidas en horas de promedio de servicio, flujo de caja requerido para la sostenibilidad financiera de la alternativa y cómo los aspectos socio-económicos influyen en el desarrollo y viabilidad de la alternativa analizada. Es posible evidenciar resultados de manera gráfica para variables como curva de demanda de electricidad de la comunidad, capacidad instalada versus demanda pico, recaudo y generación.

En el próximo apartado se revisa la implementación de información que fue ingresada al modelo del caso de estudio, lo que permitirá visualizar la interacción de variables descrita anteriormente en cada uno de los módulos y del modelo en su totalidad.

6.2.2. Descripción de la implementación del modelo

a. Módulo Usos y Demandas

Acorde a la información dispensada por (Vides-Prado et al., 2018) sobre la demanda eléctrica típica de este tipo de viviendas y que se aplica al caso de estudio descrito en el apartado 6.1, fue posible estimar que los picos de demanda para esta comunidad vienen descritos acorde a la información dispensada en Tabla 6-2 y la curva de carga horaria viene dada por la Figura 6-5.

El área bajo la curva de demanda determina que la energía consumida por este tipo de comunidad durante el día es de 3009,8 kWh/día. Cabe resaltar que la generación solar de la zona, anual viene descrita por el valor de 5.77 kWh/m²/día (NASA, n.d.).

Tabla 6-2. Picos de demanda eléctrica diaria de caso de estudio.

Rango Horario [horas]	Picos demanda máxima durante el día [kW]
6 - 7	178,76
12 - 13	195,30
18 - 21	208,69

Fuente: Elaboración propia a partir de (Vides-Prado et al., 2018).

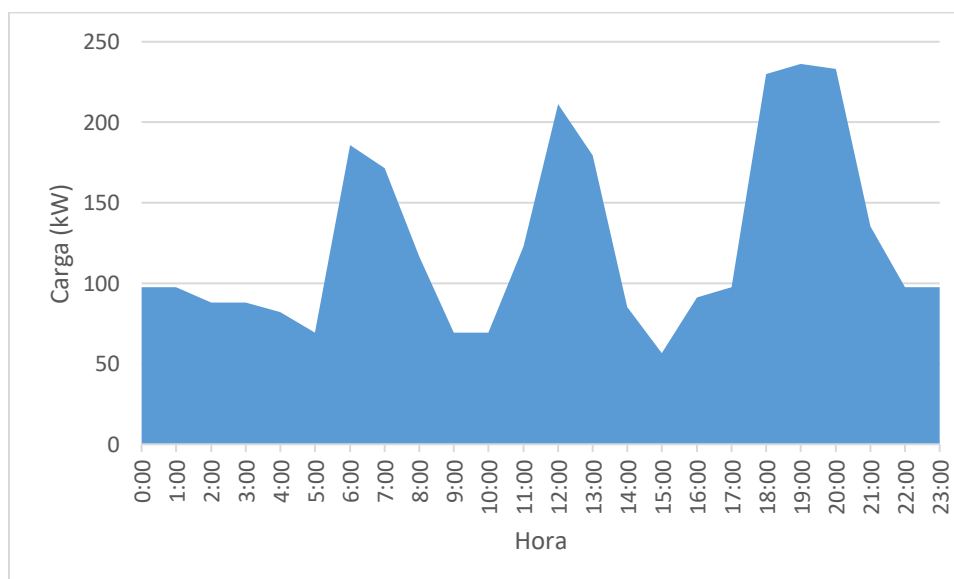


Figura 6-5. Curva de carga horaria del caso de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Vides-Prado et al., 2018).

Es importante destacar que, a estas comunidades, el gobierno y las entidades locales de Maicao proporcionan el equivalente en combustible para poder generar mediante plantas diésel un aproximado de 4 a 5 horas diarias y su aprovechamiento diario se da en las horas pico de demanda, en la mayoría de las ocasiones los habitantes de la comunidad a través de sus ingresos diarios suplen el combustible faltante requerido para cubrir la totalidad de la demanda. Es importante resaltar que, no se encontraron fuentes de información donde se detalle la cantidad, propietarios y costos relacionados a las plantas diésel instaladas en la comunidad, así como tampoco el detalle de los costos que esto implica para el Gobierno. Para efectos de este estudio, se considera que la capacidad instalada diésel con la que se cuenta actualmente sirve para cubrir el 20% de la demanda generada en horas pico (aproximadamente 526 kW), es decir lo equivalente a 115 kW.

Al momento de ingresar la información al modelo y parametrizarlo, los resultados obtenidos fueron muy similares a los calculados a partir de la información de la comunidad, obteniendo una demanda diaria energética de 3038,10 kWh/día. La información de la curva de carga se realizó obteniendo el estimado de la curva de carga por vivienda. Así mismo se relacionó la información disponible de dinámica poblacional descrita en la Tabla 6-1, y la información de actividades productivas descritas en el apartado 6.1., donde si bien, esta información es relevante para la caracterización de la comunidad, permite dilucidar que el comportamiento de la demanda viene descrito por un componente residencial.

Más adelante se describe la información implementada en el modelo específicamente en el módulo de Potencia y Energía.

b. Módulo Potencia y Energía

Como bien se realizó la explicación de este módulo en el apartado de descripción del modelo, éste se vincula al módulo anterior de usos y demandas a través de la demanda pico y el margen de potencia que nos permite obtener la curva de carga relacionada anteriormente y cómo la capacidad instalada se traduce en una necesidad de inversión en instalaciones solares y de baterías (incluyendo los costos de reposición de baterías) y todos los elementos requeridos para conformar el sistema, así como la capacidad instalada previa de la comunidad en plantas diésel.

Un estimativo para costos de instalación de nueva capacidad instalada solar que incluye costo panel o el costo de instalar 1 W solar, el costo de una batería típica implementada en este tipo de soluciones (255Ah/12V) y costos de inversor con una capacidad de 5kW, se describen en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3. Costos de los componentes del sistema fotovoltaico de la microrred para el caso de estudio.

	Módulo Fotovoltaico [USD/W]	Inversor Híbrido - 5kW [USD/Módulo Inversor]	Baterías Litio - 0,54 kW/ Und [USD/Batería]
Unidad	\$ 0.68	\$ 878	\$ 367

Fuente: Elaboración propia a partir de (Vides-Prado et al., 2018).

Es deseable que la batería se reemplace cada diez (10) años y el módulo fotovoltaico cada treinta (30) años de acuerdo a recomendaciones de fabricantes, sin embargo, esto está sujeto a condiciones de uso, temperatura, impacto y recarga.

Para efectos de la relación de estos valores en la estructura del modelo se tuvo en cuenta el valor en dólares por kW lo que permite obtener llegar a los valores relacionados en la Tabla 6-4.

Tabla 6-4. Costos en dólares por kW de los componentes del sistema fotovoltaico de la microrred para el caso de estudio.

Módulos Fotovoltaicos [USD/kW]	Inversor Híbrido - 5kW [USD/kW]	Baterías Litio - 0,54 kW/ Und [USD/kW]
\$0,00068	\$176	\$679

Fuente: Elaboración propia a partir de (Vides-Prado et al., 2018).

Esto permite concluir que el valor en dólares por kW del módulo fotovoltaico (comprendido por las celdas solares y los inversores híbridos) es de \$175,60 USD/kW y el costo del almacenamiento es de \$679 USD/kW, valores ingresados en los costos de inversión relacionados en el módulo de potencia y energía del modelo en Powersim.

La capacidad del módulo fotovoltaico (comprendido por las celdas solares y los inversores híbridos) y de las baterías fueron calculados a partir de la demanda pico del sistema cuyo valor de referencia es 526,53 kW. Lo que representa en costos totales acorde a las cantidades requeridas para este sistema, los valores relacionados en la Tabla 6-5.

Tabla 6-5. Costos totales de inversión de los componentes del sistema fotovoltaico de la microrred para el caso de estudio.

Módulos Fotovoltaicos [USD]	Inversor Híbrido - 5kW [USD]	Baterías Litio - 0,54 kW/ Und [USD]
\$ 358.043	\$ 92.459	\$ 357.524

Fuente: Elaboración propia.

Es importante aclarar que dada la naturaleza de este trabajo de investigación no se tendrá en cuenta costos de instalación adicional diésel, ni se implementará la capacidad instalada en esta tecnología, pues se busca que la comunidad base su sostenibilidad energética en el sistema de la microrred.

En el próximo apartado se discutirá la información tenida en cuenta para relacionar y parametrizar el módulo de recaudos y generación del modelo.

c. Módulo Recaudos y Generación

En la descripción de este módulo, se estableció que dentro de su alcance se encontraba incorporar los parámetros financieros requeridos para la operación del sistema de la microrred: la tarifa, recaudo, subsidios que puede presentar la comunidad del caso de estudio y gastos de Administración, Operación y Mantenimiento (AOM) de la generación asociada al funcionamiento de la microrred.

Se inicia entonces, con los costos operacionales anuales considerados en un sistema que implementa módulos fotovoltaicos e inversores. Normalmente, estos son los elementos que potencialmente representan los mayores costos de inversión para la microrred y pueden ser contabilizados para este sistema calculado a partir de 526,53 kWp como 0,26 USD/kW/mes (Armendáriz et al., 2017). Por lo tanto, los costos totales operacionales, también conocidos como gastos AOM (Administración, Operación y Mantenimiento) vienen descritos acorde a la información presentada en la Tabla 6-6. Estos valores fueron ingresados en los costos operacionales relacionados en el módulo de potencia y energía del modelo en Powersim.

Cabe resaltar que estos costos de AOM, solo consideran los gastos asociados a los mantenimientos del módulo fotovoltaico y de los inversores en una ventana anual. Se considera que no se tendrán costos variables asociados pues la operación de este sistema se encontrará a cargo de la comunidad. De acuerdo a (Armendáriz et al., 2017), los costos de mantenimiento asociados a baterías son despreciables.

Tabla 6-6. Costos totales operacionales o gastos AOM anuales asociados al mantenimiento de los componentes del sistema de la microrred para el caso de estudio.

Módulos Fotovoltaicos e inversores híbridos [USD]
--

\$ 1.643,7

Fuente: Elaboración propia a partir de (Armendáriz et al., 2017).

Basándose en los costos totales de inversión y los costos totales de AOM de los módulos fotovoltaicos y los inversores híbridos en una ventana de 30 años (vida útil del sistema), y considerando una generación real estimada a partir de la integración de los dos módulos anteriores

(Usos y demandas y Potencia y Energía) fue posible establecer un valor tarifario en USD/kWh acorde a las necesidades establecidas y la demanda atendida durante la vida útil del sistema.

La generación real durante los 365 días calendario de cada año dentro de la ventana de vida útil se describe en la Tabla 6-7.

Tabla 6-7. Generación real por año dentro de la ventana de vida útil del sistema de la microrred.

Año	Generación Real Total
2020	0 kWh
2021	1108906,5 kWh
2022	1108820,005 kWh
2023	1108820,012 kWh
2024	1112411,612 kWh
2025	1120492,432 kWh
2026	1128572,902 kWh
2027	1136653,371 kWh
2028	1144733,841 kWh
2029	1152814,311 kWh
2030	1160894,78 kWh
2031	1168975,25 kWh
2032	1177055,72 kWh
2033	1185136,19 kWh
2034	1193216,659 kWh
2035	1201297,129 kWh
2036	1209377,599 kWh
2037	1217458,069 kWh
2038	1225538,538 kWh
2039	1233619,008 kWh
2040	1241699,478 kWh
2041	1250677,847 kWh
2042	1258758,247 kWh
2043	1267736,617 kWh
2044	1276714,917 kWh
2045	1285693,216 kWh
2046	1294671,516 kWh
2047	1303649,816 kWh
2048	1312628,115 kWh
2049	1321606,415 kWh
2050	1330584,715 kWh

Fuente: Elaboración propia a partir de (Garcés Arango, 2019).

Es importante mencionar que durante el primer año de funcionamiento de la microrred no se reporta generación por la estimación constructiva temporal que implica su desarrollo y se decide hacer una evaluación considerando que se cubrirá toda la demanda eléctrica a través de la instalación del módulo fotovoltaico y del sistema de almacenamiento. A partir de los valores de generación real de la microrred descritos en la Tabla 6-7, es posible calcular la generación total durante la ventana de vida útil del sistema (30 años) que corresponde a un valor de **36.239.214,83 kWh**. Este valor es coherente con el aumento progresivo de la demanda dentro de la ventana de tiempo del sistema, que se ve regida por la dinámica poblacional del caso de estudio, siendo el impacto considerado en términos de demanda residencial.

De esta manera la tarifa estimada se calcula a partir de los costos totales de inversión, los costos operativos y de reemplazos durante el periodo de 30 años y la generación total real del sistema que corresponde a la misma medida de demanda atendida. Basada en esta premisa el valor de la tarifa total corresponde a un valor de **0,043 USD/kWh**. Este valor corresponde al ingresado en el módulo de Recaudos y generación de Powersim y que garantiza cubrir tanto los costos de inversión como los costos AOM asociados al mantenimiento del sistema de microrred implementado para el caso de estudio. Sin embargo, a través de los resultados obtenidos en el modelo y la visualización del comportamiento que implica en el flujo de caja esta misma tarifa, es posible notar que este recaudo sigue sin ser suficiente a lo largo del tiempo para la reposición de costos de baterías. En la Figura 6-6, se alcanza a apreciar la variación significativa que supone realizar este gasto para la comunidad y cómo en esos 30 años no se alcanza al menos la garantía de ser capaces de asumir los gastos de las tres (3) reposiciones requeridas de baterías y quedar en un punto de equilibrio al finalizar la ventana de tiempo, obteniendo incluso valores de pérdida donde el recaudo neto (Z) adquiere un valor de -\$99.074,67USD.

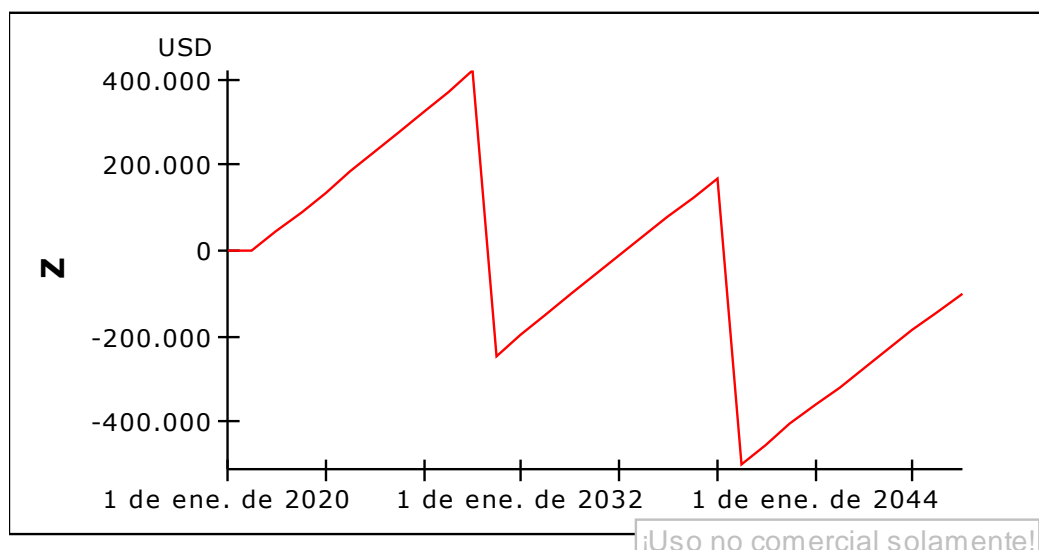


Figura 6-6. Comportamiento del recaudo del sistema de la microrred dentro de la ventana de estudio de 30 años con un valor tarifario de 0,043 USD/kWh.

Fuente: Elaboración a partir de (Garcés Arango, 2019).

A través de la implementación del modelo es posible establecer que el punto de equilibrio (0) se supera cuando la tarifa se aumenta al valor de **0,046 USD/kWh**, donde el recaudo neto (Z) adquiere un valor de 5.651,22 USD, como se aprecia en la Figura 6-7.

A partir de este valor tarifario, se puede establecer que el sistema es auto sostenible.

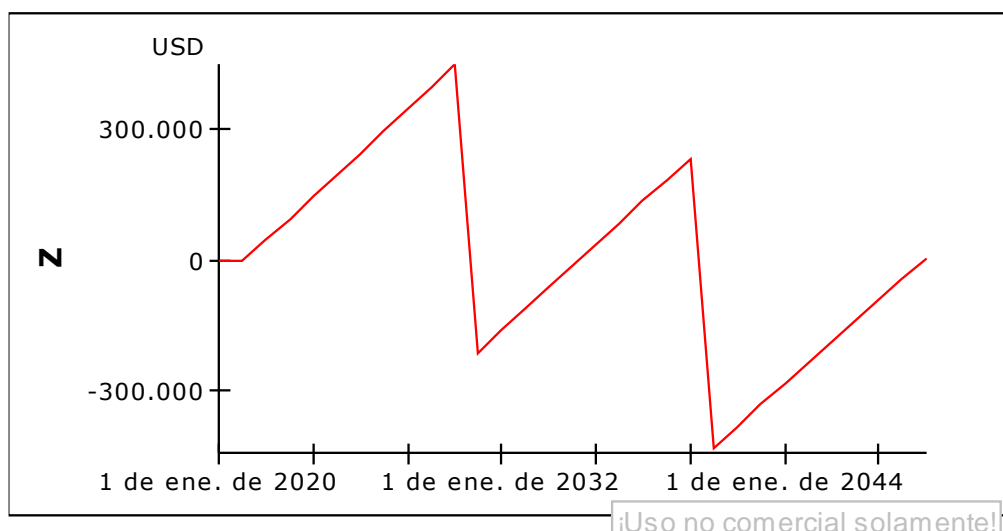


Figura 6-7. Comportamiento del recaudo del sistema de la microrred dentro de la ventana de estudio de 30 años con un valor tarifario de 0,046 USD/kWh.

Fuente: Elaboración a partir de (Garcés Arango, 2019).

Como es posible apreciar en la Figura 6-7, el flujo de caja de la comunidad al momento de realizar las inversiones para la compra por reemplazo de baterías y de manera general dentro de la ventana de tiempo, se obtiene un flujo de caja negativo, lo que puede implicar endeudamiento de parte de la comunidad. El valor tarifario que asegura que no solo el recaudo alcance el punto de equilibrio cero (0) sino que se obtenga un flujo de caja siempre positivo asciende al valor de **0,065 USD/kWh**, donde el recaudo neto (Z) adquiere un valor de 668.915,19 USD, como se aprecia en la Figura 6-8.

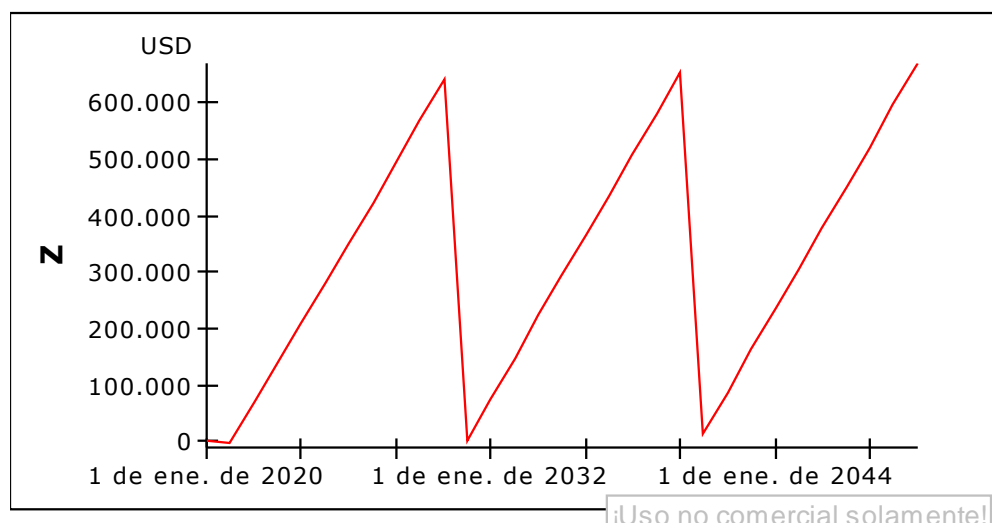


Figura 6-8. Comportamiento del recaudo del sistema de la microrred dentro de la ventana de estudio de 30 años con un valor tarifario de 0,065 USD/kWh.

Para objetos de este trabajo de investigación se trabajará con el valor referencial tarifario de **0,046 USD/kWh**, valor a partir del cual se puede establecer que el sistema es auto sostenible.

7. Validación del modelo

Una vez el modelo fue parametrizado en su totalidad abarcando cada uno de sus módulos: usos y demandas, potencia y energía y recaudos y generación, es necesario realizar la validación del mismo. Este paso es de fundamental importancia dentro de la metodología de dinámica de sistemas e involucra componentes tanto cuantitativos como cualitativos. Dentro del alcance de este trabajo de investigación se desarrollará acorde a cómo lo plantea Barlas (Barlas, 1994) en su artículo *Model validation in System Dynamics*, específicamente en lo que respecta a las pruebas de estructura directa que involucran los siguientes pasos: 7.1. Prueba de verificación de parámetros, 7.2. Prueba de valores extremos y 7.3. Prueba de consistencia dimensional (Barlas, 1994). No hace parte del alcance de este trabajo de investigación las pruebas de verificaciones estructurales pues éstas competen estrictamente al proceso de creación del modelo. Asimismo, dentro de este apartado se desarrollará un análisis de sensibilidad que permitirá identificar alternativas, tendencias, combinaciones y diferenciar casos y resultados mediante el análisis sistémico de un conjunto complejo de variables, de una forma simple y efectiva.

7.1. Prueba de verificación de parámetros

La verificación de parámetros evalúa los parámetros constantes del modelo comparándolos con el conocimiento del sistema real de forma conceptual y numérica (Barlas, 1994). Los parámetros implementados en el modelo se encuentran de acuerdo con el conocimiento numérico y descriptivo del sistema modelado. Éstos fueron estimados o tomados a partir de fuentes de información confiables como artículos de revistas indexadas, criterios de expertos y entidades públicas encargadas de registrar y analizar la información aquí descrita. En la Tabla 7-1 se describen cada uno de los parámetros implementados en el modelo.

Tabla 7-1. Descripción y explicación de parámetros implementados en el modelo.

Parámetro	Significado	Valor	Fuente
Dinámica Poblacional	Cambios demográficos de la comunidad del caso de estudio.	Tasa Natalidad- 1,8%	Elaboración propia a partir de datos tomados de (DANE, Morales & Cifuentes, 2007).
		Tasa Mortalidad- 1%	
		Tasa Migración – 0,11%	
Curva de carga de la población (Residencial)	Comportamiento de la demanda de energía eléctrica en la comunidad del caso de estudio.	Carga en kW durante 24 horas del día de cada vivienda de la comunidad del caso de estudio.	Elaboración propia a partir de datos de (Vides-Prado et al., 2018)
Población	Número de personas que conforman la	6300 personas.	A partir de información tomada

Parámetro	Significado	Valor	Fuente
	comunidad del caso de estudio.		de (Vides-Prado et al., 2018) y criterios de expertos.
Viviendas	Número de viviendas en las que habita la población del caso de estudio.	1235 viviendas.	Elaboración propia a partir de (DANE, 2005).
Radiación Solar	Medida de las radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol en un determinado punto del planeta Tierra, específicamente en la zona del caso de estudio.	5,77 W/m2	A partir de información tomada de (NASA, n.d.).
Costo kW Almacenamiento	Costo total de inversión por kW de las baterías a implementar en el sistema de la microrred, teniendo en cuenta su capacidad.	679 USD/kW	A partir de información tomada de (Vides-Prado et al., 2018).
Costos Operativos y Variables (Mantenimiento del Sistema)	Costo total del AOM de la red considerando como gastos operativos sólo los valores asociados al mantenimiento del módulo fotovoltaico e inversores.	1643,7 USD	Elaboración propia a partir de información tomada de (Armendáriz et al., 2017).
Costos de Inversión	Costos de inversión totales relacionados con la adquisición de	175,6 USD/kW	Elaboración propia a partir de información

Parámetro	Significado	Valor	Fuente
	módulos fotovoltaicos e inversores.		tomada de (Vides-Prado et al., 2018).
Tarifa	Valor a recaudar en una ventana anual para asegurar el cubrimiento de costos de inversión, operativos, de reemplazo de baterías y la generación de energía real durante un escenario de 30 años de vida útil del sistema.	0,046 USD/kWh	Elaboración propia. Este cálculo se realizó a partir de las consideraciones de costos de inversión y costos operativos asociados al mantenimiento del sistema y considerando la generación real en la ventana de tiempo de vida útil del sistema. Valor a partir del cual el sistema es auto-sostenible.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Garcés Arango, 2019).

7.2. Prueba de valores extremos

La verificación de valores extremos involucra la evaluación de los parámetros y por lo tanto de las ecuaciones del modelo bajo condiciones extremas además de validar la verosimilitud de los valores resultantes frente al conocimiento o anticipación de lo que sucedería en condiciones similares en la vida real. A diferencia de las condiciones normales de operación, es relativamente fácil anticipar cómo cierta estructura del sistema real se comportaría bajo condiciones extremas (Barlas, 1994). En los siguientes numerales se muestra como dicha verificación en algunos parámetros afecta el resultado de referencia del modelo.

a. Tasa de natalidad, mortalidad y migración iguales a cero

La condición que se alcanza al establecer que la tasa de natalidad, mortalidad y migración son iguales a cero, es una demanda de electricidad y generación para el caso de estudio constante en el tiempo sin ningún tipo de crecimiento, ya que son parámetros cuyo crecimiento es directamente proporcional al crecimiento de la demanda y por consiguiente la generación de electricidad. Dicho comportamiento se ilustra en la Figura 7-1.

Si la demanda eléctrica se mantiene constante en el tiempo no se consideraría una expansión en capacidad del sistema de la microrred para la comunidad del caso de estudio durante la ventana considerada de vida útil de treinta (30) años.

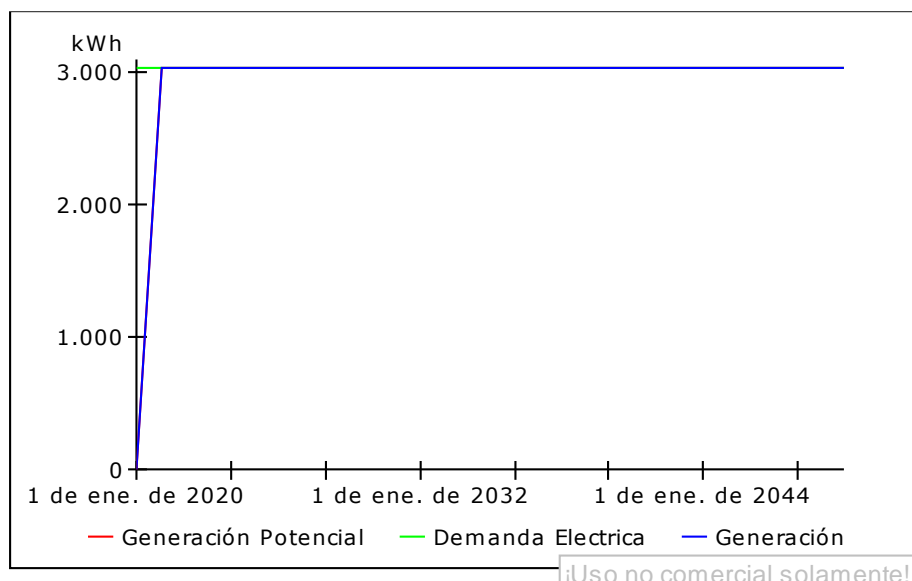


Figura 7-1. Demanda y generación eléctrica constantes en el tiempo.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Garcés Arango, 2019).

b. Demanda de electricidad y generación de electricidad inexistente

Al establecer un valor de cero en la curva de carga residencial se obtiene la condición de una demanda eléctrica y generación eléctrica inexistente. Esta condición extrema permite validar que si no existe presencia de una demanda eléctrica no hay necesidad de generar dicha electricidad, como debería suceder en la vida real. Esto se evidencia en la Figura 7-2.

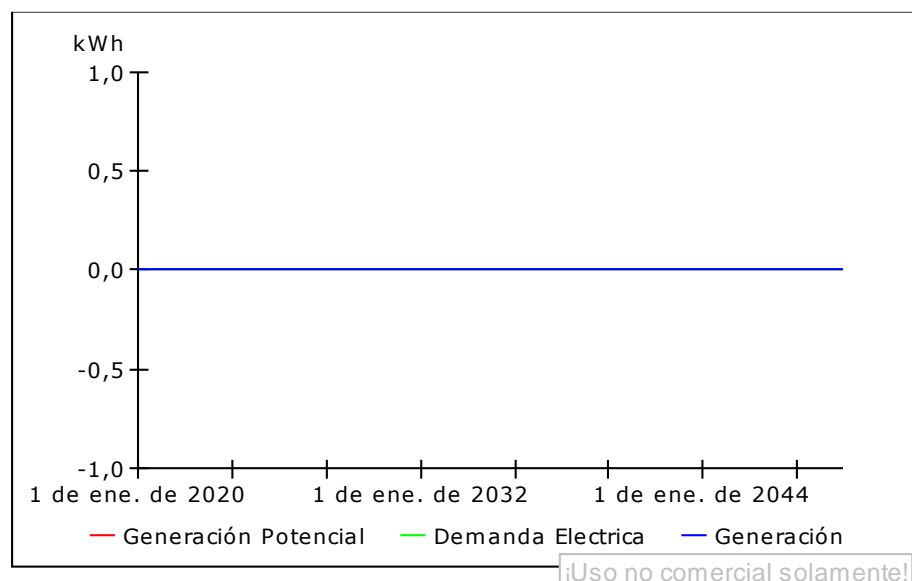


Figura 7-2. Demanda de electricidad y generación de electricidad inexistente o igual a cero.
Fuente: Elaboración propia a partir de (Garcés Arango, 2019).

c. Radiación solar igual a cero

Una vez se establece un valor de radiación solar como cero, se presenta la condición de que la generación de electricidad para el sistema es inexistente, sin embargo la condición de demanda y su respectivo crecimiento en el tiempo permanece. Tal como se evidencia en el comportamiento de la Figura 7-3 .

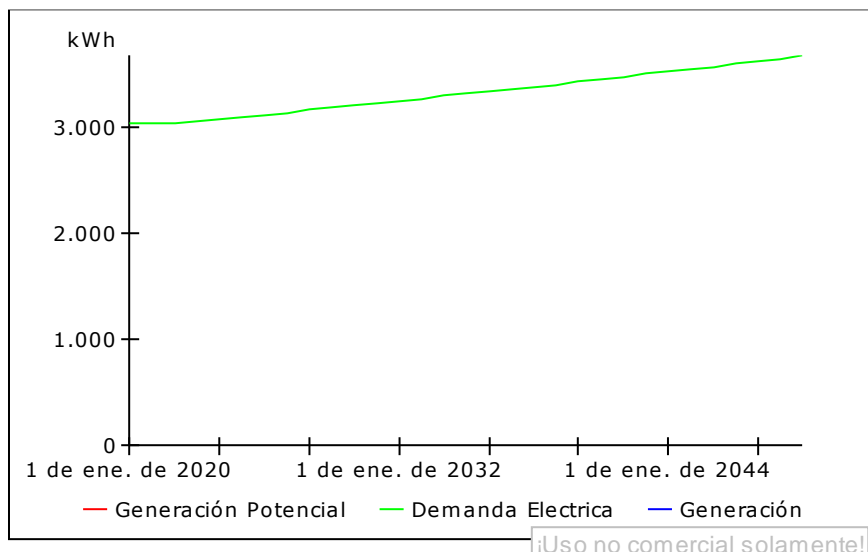


Figura 7-3. Generación de electricidad inexistente y permanencia de la demanda eléctrica y su respectivo crecimiento.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Garcés Arango, 2019).

d. Costos operativos iguales a cero

Cuando se disminuyen a cero los costos operativos que solo están relacionados a gastos de mantenimiento de acuerdo a la filosofía de este trabajo de investigación, la consecuencia natural tanto en la vida real como en el modelo debe ser que el recaudo aumente luego de alcanzar el punto de equilibrio. El valor referencial de recaudo neto (Z) del modelo luego de pasar por el punto de equilibrio, es de 5.651,22 USD como se evidencia en la Figura 6-7. Si los costos operativos asociados al mantenimiento se hacen cero, el nuevo valor de recaudo neto (Z) asciende a 54.962,22 USD cómo se logra apreciar en la Figura 7-4.

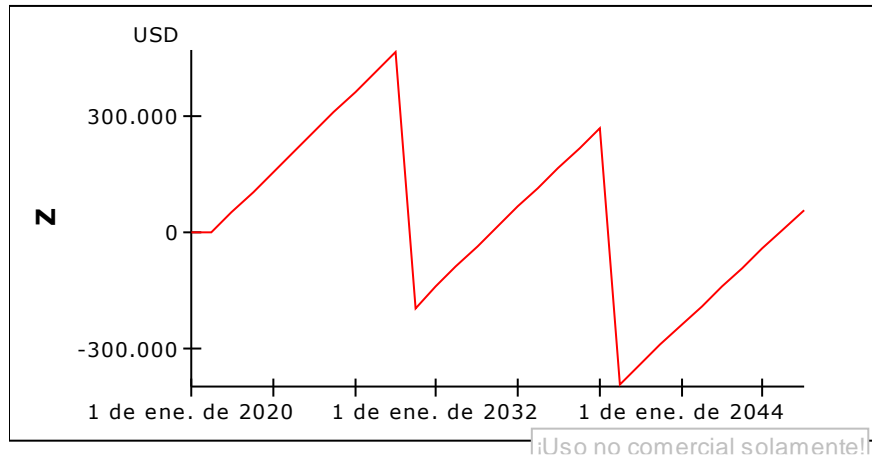


Figura 7-4. Incremento en el recaudo neto como consecuencia de la ausencia de los costos operativos asociados al mantenimiento del sistema.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Garcés Arango, 2019).

7.3. Prueba de consistencia dimensional

La prueba de consistencia dimensional involucra el análisis de dimensiones de las variables, parámetros y ecuaciones del modelo (Barlas, 1994). Por ello, se evaluó cada variable auxiliar, nivel, flujo y parámetro del modelo y se logró verificar que existiera consistencia en todas las relaciones que derivan de las mismas. Cabe aclarar, que el software donde fue desarrollado el modelo exige que exista consistencia dimensional para evaluar el sistema. Las dimensiones de los principales grupos de variables, niveles, flujos y parámetros se muestran en la Tabla 7-2.

Tabla 7-2. Verificación dimensional de los principales grupos de variables, niveles, flujos y parámetros.

Grupo de Variable, Nivel, Flujo o Parámetro	Unidad
Tasas	Porcentaje (%)
Tiempo asociado a demanda o potencia	Horas (h)
Potencia	kW
Demanda	kW/vivienda
Energía	kWh
Márgenes y Factores de Cobertura	Adimensional
Dinámica Poblacional	personas
Moneda y Gastos AOM	USD
Costos de inversión	USD/kW
Tarifarios	USD/kWh

Fuente: Elaboración propia a partir de (Garcés Arango, 2019).

Para mayor detalle de esta verificación remitirse al **Anexo A - Consistencia dimensional de todas las variables, niveles, flujos y parámetros del modelo**.

7.4. Análisis de sensibilidad

Algunas de las variables determinantes asociadas a los aspectos financieros del modelo, como costos de inversión en los módulos fotovoltaicos, costos de inversión en baterías y costos operativos asociados al mantenimiento, si bien fueron tomados de artículos de revistas indexadas, fue necesario realizar un proceso de cálculo asociado al caso específico de estudio que es abordado en este trabajo de investigación. Asimismo, sucedió con la demanda eléctrica de la comunidad del caso de estudio, variable que determina la energía total consumida por la misma.

Todas estas variables fueron sometidas a cálculos con fórmulas que se implementan en la realidad para dimensionar sistemas comprendidos de celdas solares y que también fueron implementados en el modelo. Este proceso fue abordado a partir de una hoja de cálculo de Excel.

Por ejemplo, para el caso de la energía calculada en el año cero (0) donde inicia el modelo, en Excel se obtuvo un valor de **3009,8 kWh/día** mientras que en el modelo se obtiene un valor de **3.038,1 kWh/día**, lo que representa una diferencia de sólo **28,3 kWh/día**. Por supuesto, dentro del modelo se consideran parámetros como la dinámica poblacional que inciden directamente sobre la variable de demanda eléctrica y que en una simple hoja de cálculo es difícil de apreciar.

De igual forma dentro del modelo fue posible observar el incremento en la demanda debido a las dinámicas poblacionales que presenta la comunidad como es posible observar en la Tabla 6-7, lo que permite demostrar la alta sensibilidad de la respuesta de generación real de energía con el incremento natural de la dinámica poblacional durante la venta de tiempo de estudio y que dicha información es apropiada considerando la realidad dinámica de estos sistemas.

Adicionalmente en la Figura 7-5, se puede apreciar cómo se presenta en el modelo la sensibilidad ante la tarifa calculada establecida (**0,046 USD/kWh**) para los parámetros de Recaudo (Z), Recursos Financieros de la Microrred y los Ahorros para Reposiciones de Baterías. El parámetro de la tarifa es el punto clave para asegurar la sostenibilidad del proyecto de la microrred, cómo bien se evidencia en los resultados obtenidos de este análisis de sensibilidad, que demuestra que dichas variables son altamente sensibles ante el cambio en la tarifa estimada. También es posible interpretar, que los datos son correctos, informativos y los resultados corresponden a la realidad esperada del modelo.

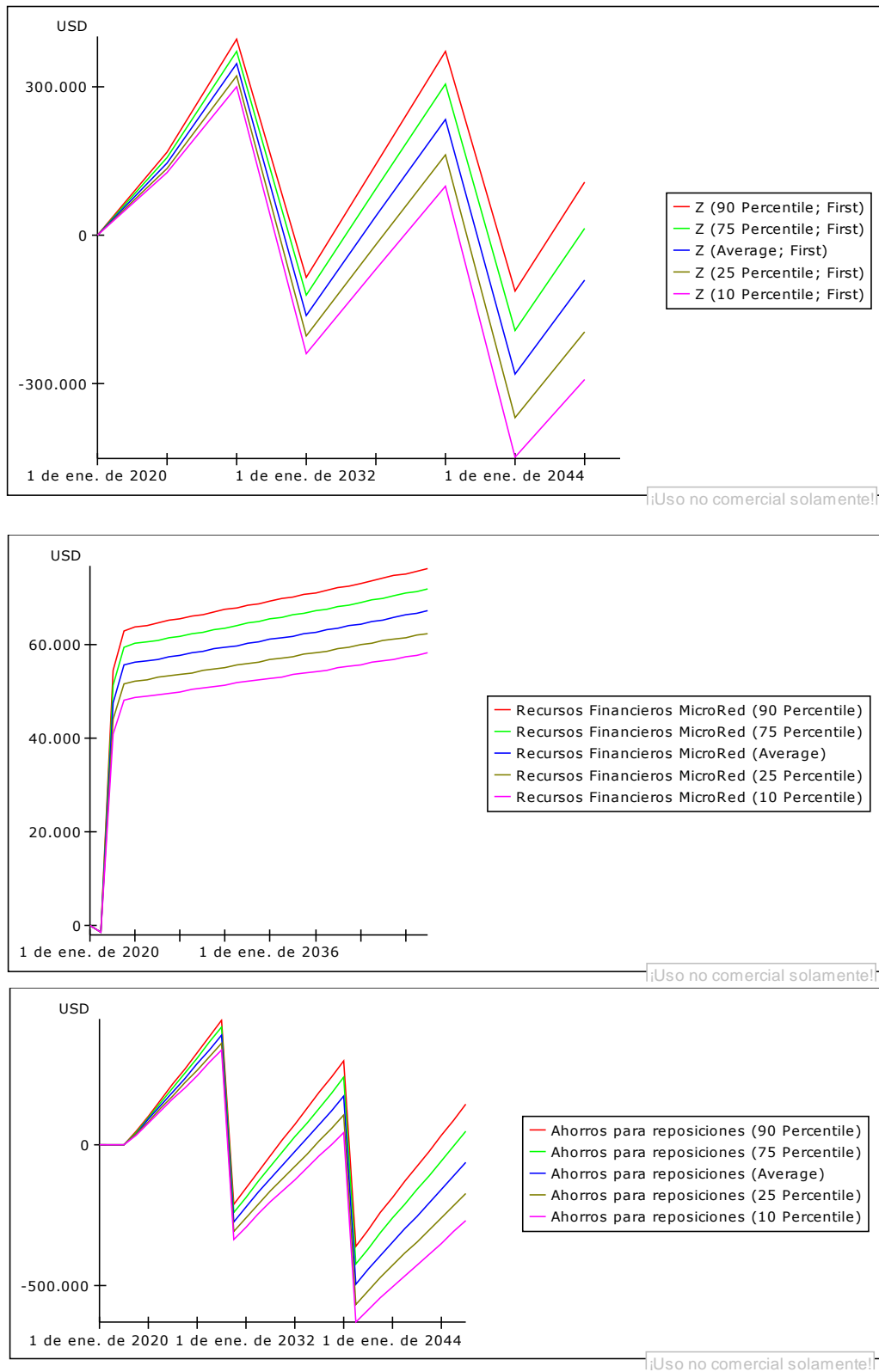


Figura 7-5. Sensibilidad del recaudo (z), los recursos financieros de la red y los ahorros para reposiciones de baterías frente al cambio de la tarifa calculada.
Fuente: Elaboración propia a partir de (Garcés Arango, 2019).

8. Análisis de resultados

Los casos analizados en este trabajo de investigación abordan cuatro enfoques principales, orientados a buscar alternativas sostenibles de la implementación de la microrred del caso de estudio y que permitan asegurar la sostenibilidad en el tiempo del sistema, son ellos: Operación comunitaria, operación por parte del operador de red, operación comunitaria con subsidios y operación por parte del operador de red incluyendo subsidios. En este apartado será posible parametrizar y medir nuevamente el modelo, resultado que se aprecia en el ítem 8.1 Análisis de casos y evidenciar los resultados de cada alternativa dependiendo del caso en el ítem 8.2 Análisis de resultados.

8.1. Análisis de casos

a. Operación comunitaria

Este escenario es el punto de referencia del modelo y el supuesto considerado a lo largo de los capítulos anteriores de este trabajo de investigación. Es el caso que permitió realizar la validación del modelo e identificar un comportamiento adecuado y consistente con la realidad. La condición actual de este escenario conlleva las siguientes premisas:

- La operación del sistema de la microrred lo realiza la comunidad por lo tanto no se asocian costos operativos y los gastos AOM solo se encuentran relacionados al componente de mantenimiento.
- El gobierno no brinda ningún tipo de subsidio.
- No existe un operador de red asociado y por lo tanto, en la tarifa no se considera utilidad del operador.
- La tarifa está compuesta por los costos de inversión de los módulos fotovoltaicos, inversores y baterías, costo de reemplazo de baterías durante el tiempo de vida útil del sistema (30 años) y costos AOM asociados al componente de mantenimiento durante la vida útil del sistema.

Los valores definidos para los parámetros y niveles para este caso en particular se encuentran descritos en el numeral 6. Metodología, y en especial detalle en el numeral 6.2.2. Implementación del modelo.

b. Operación por parte del operador de red (costos operativos en tarifa).

Para este escenario se contempla que los costos operativos están cargados en el valor tarifario, es decir, serían asumidos por un operador de la red y no por parte de la comunidad. Para este escenario se tienen en cuenta las siguientes premisas:

- La operación del sistema de la microrred lo realiza un operador de red por lo tanto se asocian costos operativos y gastos de administración y mantenimiento, esto es, gastos AOM completos.

- El gobierno no brinda ningún tipo de subsidio.
- La tarifa está compuesta por los costos de inversión de los módulos fotovoltaicos, inversores y baterías, costo de reemplazo de baterías durante el tiempo de vida útil del sistema (30 años) y gastos AOM durante la vida útil del sistema.

A continuación se presentan los valores definidos para parámetros y niveles de este caso en particular y que difieren del caso base.

Los costos operacionales anuales representativos en un sistema de microrred suelen estar asociados a los módulos fotovoltaicos y batería. Normalmente, estos son los elementos que potencialmente representan los mayores costos de inversión para la microrred y pueden ser contabilizados como el 1,5% del valor inicial de inversión para cada sistema (Breyer, Gerlach, Mueller, Behacker, & Milner, 2009). Por lo tanto, los costos totales operacionales, también conocidos como gastos AOM (Administración, Operación y Mantenimiento) vienen descritos acorde a la información presentada en la Tabla 8-1. Estos valores fueron ingresados en los costos operacionales relacionados en el módulo de potencia y energía del modelo en Powersim.

Tabla 8-1. Costos totales operacionales o gastos AOM de los componentes del sistema de la microrred para el caso de operación de parte del operador de red.

Módulos Fotovoltaicos [USD]	Inversor Híbrido - 5kW [USD]	Baterías Litio - 0,54 kW/ Und [USD]
\$ 5.370	\$ 1.386	\$ 5.363

Fuente: Elaboración propia a partir de (Breyer et al., 2009).

Basándose en los costos totales de inversión y los costos totales de AOM de los módulos fotovoltaicos, los inversores híbridos y las baterías en una ventana de 30 años (vida útil del sistema), y considerando una generación real estimada a partir de la integración de los dos módulos anteriores (Usos y demandas y Potencia y Energía) fue posible establecer un valor tarifario en USD/kWh acorde a las necesidades establecidas y la demanda atendida durante la vida útil del sistema. Este valor corresponde a 0,052 USD/kWh. Sin embargo, a través de los resultados obtenidos en el modelo y la visualización del comportamiento que implica en el flujo de caja esta misma tarifa, es posible notar que este recaudo sigue sin ser suficiente a lo largo del tiempo para la reposición de costos de baterías, es decir no alcanza a superar el punto de equilibrio. A través de la implementación del modelo es posible establecer que el punto de equilibrio (0) para esta alternativa, se alcanza cuando la tarifa se aumenta al valor de **0,055 USD/kWh**, donde el recaudo neto (Z) adquiere un valor de 5.539,89 USD.

c. Operación comunitaria con subsidios

En comparación con el primer escenario descrito en el literal a, este escenario tiene muchas similitudes en las premisas consideradas, en tanto a que cuenta con muchos aspectos en común con el caso de referencia del modelo. En este caso se cuenta con las siguientes premisas:

- La operación del sistema de la microrred lo realiza la comunidad por lo tanto no se asocian costos operativos y los gastos AOM solo se encuentran relacionados al componente de mantenimiento.
- El gobierno brinda un subsidio al componente tarifario del 10%.
- No existe un operador de red asociado y por lo tanto, en la tarifa no se considera utilidad del operador.
- La tarifa está compuesta por los costos de inversión de los módulos fotovoltaicos, inversores y baterías, costo de reemplazo de baterías durante el tiempo de vida útil del sistema (30 años) y costos AOM asociados al componente de mantenimiento durante la vida útil del sistema.

Los valores definidos para los parámetros y niveles, con respecto al caso base, sólo difieren en el parámetro de tarifa que se le asigna un valor de **0,0414 USD/kWh** mientras que al parámetro de otros subsidios (valor otorgado por el gobierno) del modelo se le asigna un restante de **166.700 USD**. Este último valor corresponde al otro 10% de la tarifa tomando en cuenta el total de generación real durante la vida útil del sistema (30 años).

d. Operación por parte del operador de red (costos operativos en tarifa) y subsidios.

Para este escenario se consideran las siguientes premisas:

- La operación del sistema de la microrred lo realiza un operador de red por lo tanto se asocian costos operativos y gastos de administración y mantenimiento, esto es, gastos AOM completos.
- El gobierno brinda un subsidio al componente tarifario del 10%.
- La tarifa está compuesta por los costos de inversión de los módulos fotovoltaicos, inversores y baterías, costo de reemplazo de baterías durante el tiempo de vida útil del sistema (30 años) y gastos AOM durante la vida útil del sistema.

Los valores definidos para los parámetros y niveles de este caso, sólo cambian con respecto al caso base, en el parámetro de tarifa que se le asigna un valor de **0,0495 USD/kWh** mientras que al parámetro de otros subsidios (valor otorgado por el gobierno) del modelo se le asigna un restante de **199.316 USD**. Este último valor corresponde al otro 10% de la tarifa tomando en cuenta el total de generación real durante la vida útil del sistema (30 años).

8.2. Análisis de resultados

a. Operación comunitaria

El valor tarifario obtenido para este caso fue de 0,046 USD/kWh. Este valor, con respecto al valor tarifario actual en Zonas No Interconectadas (ZNI) es considerablemente bajo, acorde al Informe de Diagnóstico de la Prestación del Servicio de Energía Eléctrica de la Superintendencia de Servicios Públicos de Colombia en específico la Superintendencia Delegada para Energía y Gas (SIGEP). Este informe reporta, el ranking de tarifas acorde a los estratos de las cabeceras municipales de ZNI a

corte de Diciembre de 2017, donde el valor más bajo para el estrato 1, corresponde a 212,72 COP/kWh lo que equivale a aproximadamente a 0,070 USD/kWh y el valor más alto para el estrato 1 corresponde a 251,53 COP/kWh lo que equivale a aproximadamente a 0,083 USD/kWh (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018).

Si se realiza la comparación con la tarifa actual que deben cancelar las personas que habitan en la cabecera municipal de Maicao, población más cercana a la ubicación de la comunidad del caso de estudio y que tiene acceso a la energía convencional, la tarifa calculada de **0,046 USD/kWh** sigue siendo considerada baja. Acorde al reporte del Precio Promedio Ponderado Diario de energía Transada de la compañía administradora del mercado XM S.A. E.S.P., el precio promedio de energía de este municipio que tiene acceso a la red convencional, en el mes de abril de 2019 fue de 365,65 COP/kWh lo que equivale a 0,121 USD/kWh (XM, 2019).

Adicionalmente, el valor referencial de recaudo neto (Z) del modelo luego de pasar por el punto de equilibrio, es de **5.651,22 USD**. Ver Figura 8-1.

Lo anterior, permite inferir y concluir que el valor de la tarifa calculada y obtenida a partir del modelo en el caso base, es considerablemente baja respecto a las existentes tanto para ZNI como para poblaciones con acceso a la red convencional de energía, y viabiliza el desarrollo de una alternativa de microrred auto sustentable y auto sostenible.

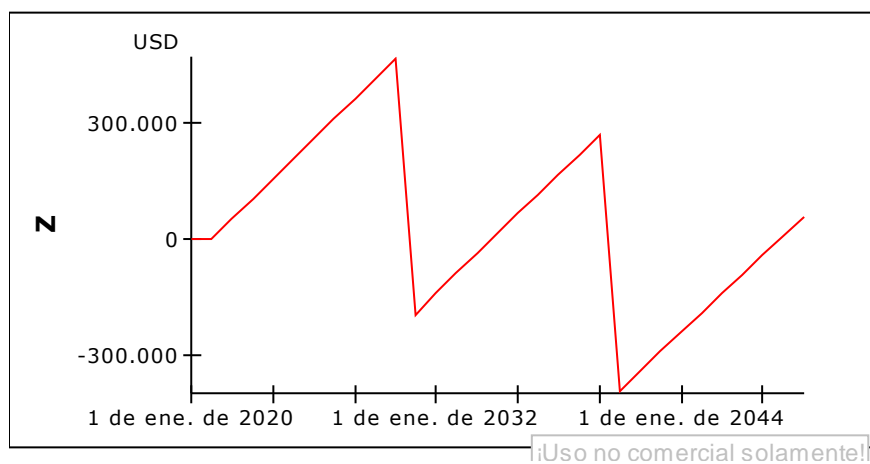


Figura 8-1. Valor referencial de recaudo neto (Z) luego de pasar por el punto de equilibrio para el caso de operación comunitaria.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Garcés Arango, 2019).

b. Operación por parte del operador de red (costos operativos en tarifa).

El valor tarifario de 0,055 USD/kWh con respecto al valor tarifario actual en Zonas No Interconectadas (ZNI) es considerablemente bajo, pues el valor para estrato 1 ubicado en estas zonas es de 0,070 USD/kWh (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018) y acorde a estándares del precio promedio de energía del municipio más cercano que tiene acceso a la red

convencional, también se considera muy inferior pues el valor para este municipio se encuentra en 0,121 USD/kWh (XM, 2019).

Adicionalmente y de forma similar al caso de estudio base, el valor referencial de recaudo neto (Z) del modelo luego de pasar por el punto de equilibrio, es de **319.828,89 USD**, lo que permite establecer que el valor de la tarifa calculada para este caso y obtenida a partir del modelo viabiliza también el desarrollo de una microrred sostenible, sin embargo no cuenta con el ingrediente comunitario que constituye una alternativa muchos más auto sustentable. Ver Figura 8-2.

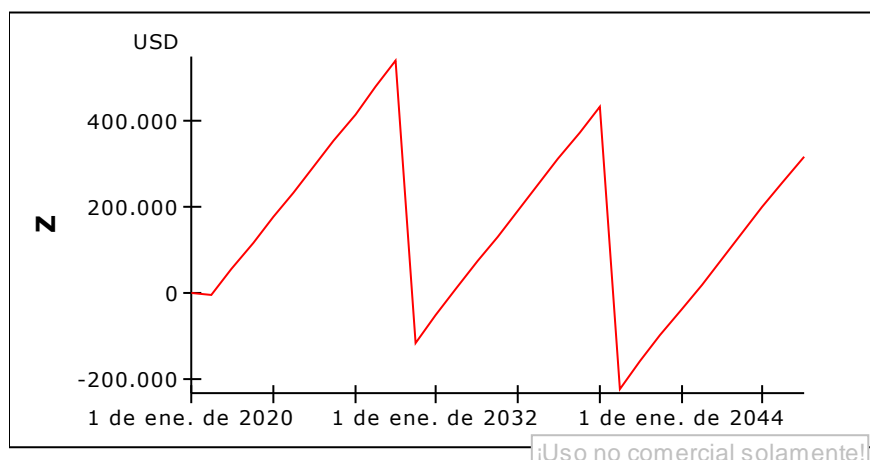


Figura 8-2. Valor referencial de recaudo neto (Z) luego de pasar por el punto de equilibrio para el caso de operación por parte del operador de red.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Garcés Arango, 2019).

c. Operación comunitaria con subsidios

Para este caso, el valor referencial de recaudo neto (Z) del modelo luego de pasar por el punto de equilibrio, es de **4.846.071,52 USD**. Ver Figura 8-3. Lo que representa un incremento exponencial en los recursos percibidos respecto a los casos anteriores. Si se consideran los subsidios otorgados por el gobierno como un 10% del cálculo de la tarifa considerando el total de energía generada durante 30 años, el valor que se obtendría de recaudo estaría sobrepasando los aproximados **2.000.000,00 USD** en lo que se encuentra valorado el sistema de microrred considerando gastos de inversión e incluidos gastos operativos (que para este caso no son considerados), lo que permitiría el reforzamiento del sistema y la posible re-inversión de parte de la organización comunal de dichos recursos.

Cabe resaltar que se consideró un porcentaje de subsidio de parte del gobierno bajo (10%), normalmente este valor puede ascender a un 40% para estratos 1 y 2, lo que daría mayor margen de ganancia al sistema.

Por lo tanto, este sistema de microrred podría considerarse también una inversión comunitaria que permite a la comunidad hacerse a ingresos que pueden ser invertidos en otras actividades

económicas que viabilicen un desarrollo incremental de la misma. Adicionalmente, se puede concluir que el valor de la tarifa calculada y obtenida a partir del modelo en este caso, es considerablemente baja respecto a las existentes tanto para ZNI como para poblaciones con acceso a la red convencional de energía, y viabiliza el desarrollo de una alternativa de microrred auto sustentable, auto sostenible al ser administrada por la comunidad.

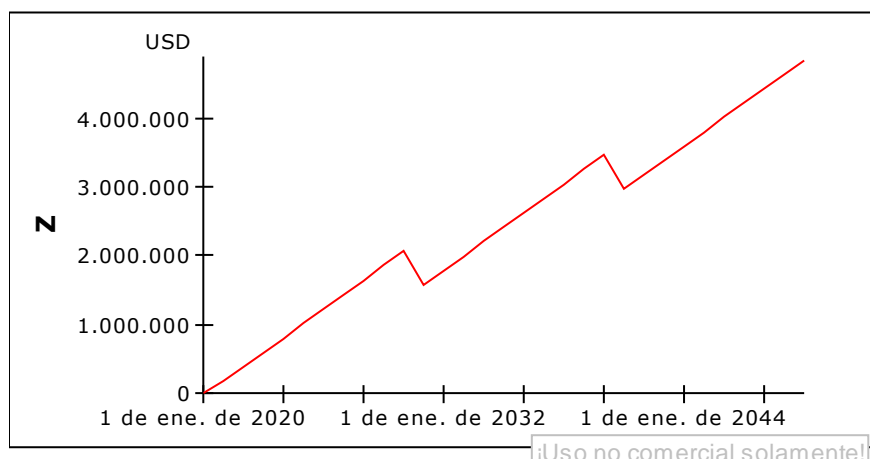


Figura 8-3. Valor referencial de recaudo neto (Z) luego de pasar por el punto de equilibrio para el caso de operación comunitaria con subsidios.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Garcés Arango, 2019).

d. Operación por parte del operador de red (costos operativos en tarifa) y subsidios.

Para este caso, el valor referencial de recaudo neto (Z) del modelo luego de pasar por el punto de equilibrio, es de **6.107.311,42 USD**. Ver Figura 8-4. Lo que representa un incremento exponencial y considerable como se evidenció en el caso anterior del literal c. Si se consideran los subsidios otorgados por el gobierno como un 10% del cálculo de la tarifa considerando el total de energía generada durante 30 años, el valor que se obtendría de recaudo estaría sobrepasando los aproximados **2.000.000,00 USD** en lo que se encuentra valorado el sistema de microrred considerando gastos de inversión e incluidos gastos operativos (considerados en este caso), lo que permitiría el reforzamiento del sistema y la posible re-inversión de parte del Operador de Red de dichos recursos.

Cabe resaltar que se consideró un porcentaje de subsidio de parte del gobierno bajo (10%), normalmente este valor puede ascender a un 40% para estratos 1 y 2, lo que daría mayor margen de ganancia al sistema.

Por lo tanto, este sistema de microrred podría considerarse una inversión rentable que permite al Operador de Red, en este caso, hacerse a ingresos que pueden ser invertidos en otras actividades económicas que viabilicen un desarrollo incremental de la alternativa ya implementada.

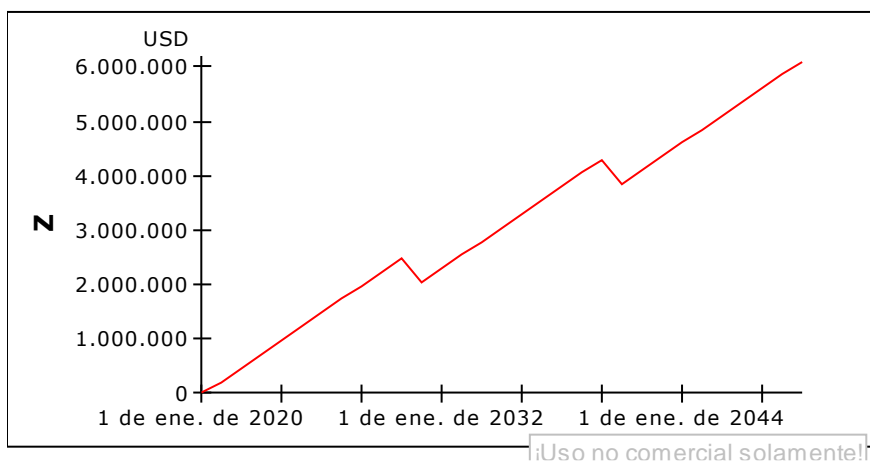


Figura 8-4. Valor referencial de recaudo neto (Z) luego de pasar por el punto de equilibrio para el caso de operación por parte del operador de red y subsidios.
Fuente: Elaboración propia a partir de (Garcés Arango, 2019).

En conclusión, a través de los análisis de casos y resultados del capítulo 8, se permitió evaluar el impacto de un proyecto de microrredes en una comunidad colombiana determinada, en este caso en la comunidad Wayuu ubicada cercana al municipio de Maicao en la Guajira. A su vez, se evaluó su caracterización y parametrización, identificando alternativas para la implementación de proyectos de microrredes en esta comunidad colombiana.

De esta manera se verifica el cumplimiento de los objetivos general y específico de este trabajo de investigación y cuyo detalle de consecución se reporta en el capítulo 9 que se presenta a continuación.

9. Conclusiones y Recomendaciones

En este capítulo se presentan los principales logros y aportes obtenidos a partir de este trabajo de investigación así como las recomendaciones para trabajos futuros.

9.1. Conclusiones

9.1.1 Reporte del cumplimiento de objetivos

De acuerdo al objetivo planteado de *“Caracterizar una comunidad colombiana en términos económicos y socio-culturales”* se desarrolló un análisis entorno a la población Wayuu residente en el municipio de Maicao, La Guajira, en donde se asientan 66 comunidades de esta etnia. Para objeto de la aplicación del modelo se analizó un entorno de viviendas que abarcaron un total de 6.300 personas, comunidad que cuenta capacidad de organización y cooperación y cercanía a la cabecera municipal de Maicao. Se describieron y analizaron las principales actividades económicas y se caracterizó a esta comunidad de acuerdo a su entorno y vida social, parámetros que dictaminan el comportamiento de su demanda eléctrica.

A continuación, de acuerdo al objetivo de *“Parametrizar un modelo de simulación existente que permita evaluar el impacto de un proyecto de microrredes en una comunidad colombiana determinada”* se describió y explicó el modelo existente trabajado, el cual se configuró de acuerdo a la información de la comunidad del caso de estudio. Se ajustaron niveles, variables auxiliares y parámetros que permitieron aterrizar el caso de estudio mediante la dinámica de sistemas de un sistema de microrred a diferentes alternativas sostenibles que pueden servir para suplir energéticamente las comunidades de Zonas No Interconectadas y específicamente analizar su aplicación a la comunidad Wayuu del caso de estudio.

En este sentido, y en concordancia con el objetivo de *“Identificar alternativas para la implementación de proyectos de microrredes en una comunidad colombiana determinada”* se analizaron diferentes escenarios bajo los cuáles puede operar este sistema de microrred, siendo el de mayor rentabilidad financiera y por auto-sostenibilidad el más recomendado *“Operación comunitaria con subsidios”*. Cabe resaltar que esta alternativa cuenta con el mejor componente de combinación social: aporte gubernamental y desarrollo comunitario.

Finalmente, el objetivo central de este trabajo *“Evaluar el impacto de un proyecto de microrredes en una comunidad colombiana determinada”* fue conseguido a través del análisis crítico y sistémico de los objetivos previos, presentando en este trabajo de investigación recomendaciones al momento de considerar una solución energética a través de un sistema de microrred comunitaria.

9.1.2 Aportes a la comprensión del problema

Dentro de los principales aportes a la comprensión del problema de este trabajo de investigación se pueden encontrar los siguientes aspectos:

- Considerar el crecimiento de la demanda a través de la dinámica poblacional conlleva a ajustes sobre el dimensionamiento del proyecto y consideraciones adicionales dentro del alcance del mismo.
- Se puede cubrir toda la demanda eléctrica a través de un proyecto solar incluyendo baterías sin incurrir en sobrecostos.
- Es posible solventar un proyecto de electrificación de microrred solar incluyendo baterías a través de una tarifa inferior a la que actualmente deben pagar las comunidades de Zonas No Interconectadas de estrato 1.
- Aunque el mejor resultado se obtuvo con autogestión y subsidio del gobierno, se evidencia que solo con autogestión se puede dar sostenibilidad al proyecto durante los 30 años esperados.

9.2. Recomendaciones

Para próximos trabajos de investigación se recomienda analizar un caso de estudio con información primaria recolectada directamente desde la comunidad, lo que brinda certeza al respecto de actividades económicas específicas de cada caso de estudio. Este aspecto es definitivo a la hora de definir cuál es la mejor alternativa tanto técnica como económica para abordar el modelamiento del sistema.

Asimismo, se sugiere realizar un análisis financiero en detalle de las alternativas a implementar en el modelo dinámico del sistema de la microrred, esto es, modelos de negocio puntuales y encontrar una forma de relacionarlos con la medida de productividad económica, de acuerdo a la actividad que ejecuta la comunidad, esto es en definitiva, lo que determina si existe posibilidad de que la comunidad tenga la disponibilidad para ser capacitado en la operación y operar un sistema de microrred.

También es importante considerar en trabajos futuros la evaluación de diferentes alternativas tecnológicas como fuentes primarias de energía. En este trabajo de investigación sólo se trabajó la solución a través de módulos fotovoltaicos.

Por último, se recomienda encontrar la manera de involucrar a través del modelo, los aspectos socio-económicos que faciliten la estimación de los impactos no monetarios o sociológicos de las microrredes en las comunidades bajo estudio.

10. Referencias

- Adil, A. M., & Ko, Y. (2016). Socio-technical evolution of Decentralized Energy Systems: A critical review and implications for urban planning and policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1025–1037. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.079>
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2015). *Caracterización socio-laboral de mujeres wayuu*.
- Ahmad, S., Mat, R., Muhammad-sukki, F., & Bakar, A. (2016). Application of system dynamics approach in electricity sector modelling: A review, 56, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.034>
- Akinyele, D. O., & Rayudu, R. K. (2016). Strategy for developing energy systems for remote communities: Insights to best practices and sustainability. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 16, 106–127. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.05.001>
- Alvial-Palavicino, C., Garrido-Echeverría, N., Jiménez-Estévez, G., Reyes, L., & Palma-Behnke, R. (2011). A methodology for community engagement in the introduction of renewable based smart microgrid. *Energy for Sustainable Development*, 15(3), 314–323. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.06.007>
- Armendáriz, M., Heleno, M., Cardoso, G., Mashayekh, S., Stadler, M., & Nordström, L. (2017). Coordinated microgrid investment and planning process considering the system operator, 200, 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.076>
- Barlas, Y. (1994). Model validation in system dynamics. *In the Proceeding of the 1994 International System Dynamics ... of the 1994 International System Dynamics*
- Bonilla Castro E., H. P. J. & J. H. C. (2009). *La investigación. Aproximaciones a la construcción del conocimiento científico*. Alfaomega.
- Breyer, C., Gerlach, A., Mueller, J., Behacker, H., & Milner, A. (2009). Grid-Parity Analysis for Eu and Us Regions and Market Segments - Dynamics of Grid-Parity and Dependence on Solar Irradiance, Local Electricity Prices and Pv Progress Ratio. *Scenario*. <https://doi.org/10.4229/24thEUPVSEC2009-6DV.2.34>
- Burke, M. J., & Stephens, J. C. (2018). Corrigendum to “Energy democracy: Goals and policy instruments for sociotechnical transitions” [Energy Res. Soc. Sci. 33 (2017) 35–48](S2214629617303031)(10.1016/j.erss.2017.09.024). *Energy Research and Social Science*, 42(September), 198. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.03.030>
- Ceballos, F., Arango, S., Dyner, I. (2009). La Energía como una Herramienta para el Desarrollo Sostenible en las Zonas Rurales Aisladas. *Una Comunidad Que Aprende Dinámica de Sistemas y Con Dinámica de Sistemas*, 171–177. Retrieved from https://comunidadcolombianads.com/wp-content/uploads/2017/07/ECDS2009_Memorias.pdf
- Chen, W., & Wei, P. (2018). Socially optimal deployment strategy and incentive policy for solar photovoltaic community microgrid: A case of China. *Energy Policy*, 116(January), 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.056>

- DANE, Morales, E. R., & Cifuentes, M. R. (2007). Informe Cambios Demográficos.
- DANE. (2005). Metodología Censo General 2005.
- Departamento Nacional de Planeación. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): Agenda de Desarrollo Post-2015 de la Organización de las Naciones Unidas, 78. Retrieved from <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/summit/>
- Dixon, T., Lannon, S., & Eames, M. (2018). Reflections on disruptive energy innovation in urban retrofitting: Methodology, practice and policy. *Energy Research and Social Science*, 37(September 2017), 255–259. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.009>
- Domenech, B., Ranaboldo, M., Ferrer-Martí, L., Pastor, R., & Flynn, D. (2018). Local and regional microgrid models to optimise the design of isolated electrification projects. *Renewable Energy*, 119, 795–808. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.060>
- Franco, C., Dyner, I., & Hoyos, S. (2008). Contribución de la Energía al Desarrollo de Comunidades Aisladas No Interconectadas: Un caso de Aplicación de la Dinámica de Sistemas y los Medios de Vida Sostenibles en el Suroccidente Colombiano. *DYNA*, 75(154), 199–214. Retrieved from <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/1728/11624>
- Gaona, E. E., Trujillo, C. L., & Guacaneme, J. A. (2015). Rural microgrids and its potential application in Colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 125–137. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.176>
- Garcés Arango, E. (2019). *Alternativas de gestión para el suministro eléctrico sostenible en zonas no interconectadas*. Universidad Nacional de Colombia.
- International Work Group for Indigenous Affairs. Colombia. (2016). International Work Group for Indigenous Affairs. Colombia. Retrieved January 28, 2019, from <http://www.iwgia.org/regions/latin-america/colombia>
- Jimenez, R. (2017). Barriers to electrification in Latin America: Income, location, and economic development. *Energy Strategy Reviews*, 15, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2016.11.001>
- Karlsson, A., & Persson, T. (1998). Powersim: A short introduction, 1–30.
- Kelly-Pitou, K. M., Ostroski, A., Contino, B., Grainger, B., Kwasinski, A., & Reed, G. (2017). Microgrids and resilience: Using a systems approach to achieve climate adaptation and mitigation goals. *Electricity Journal*, 30(10), 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2017.11.008>
- Kingo. (2019). Kingo Web Page. Retrieved October 26, 2019, from <http://www.kingoenergy.com>
- Mandelli, S., Barbieri, J., Mereu, R., & Colombo, E. (2016). Off-grid systems for rural electrification in developing countries: Definitions, classification and a comprehensive literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1621–1646. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.338>
- Marnay, C. (2016). *Microgrids: Finally Finding their Place. Future of Utilities - Utilities of the Future: How Technological Innovations in Distributed Energy Resources Will Reshape the Electric Power Sector*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804249-6.00003-8>

- Milis, K., Peremans, H., & Van Passel, S. (2018). The impact of policy on microgrid economics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(May 2017), 3111–3119. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.091>
- Ministerio de Minas y Energía. (2016). Colombia avanza en la incorporación de energías renovables al sistema eléctrico. Retrieved February 20, 2019, from <https://www.minminas.gov.co/web/1018o1332?IdNoticia=23829018>
- Moore, C., Benedict, T., Bilodeau, N., & Vitkus, P. (2013). *BPM CBOK Version 3. 0: Guide to the Business Process Management Common Body of Knowledge. BPM CBOK Version 3.0: Guide to the Business Process Management Common Body Of Knowledge.*
- NASA. (n.d.). Surface Meteorology and Solar Energy n.d. Retrieved April 5, 2019, from <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- O'Connor, P., & Jacobs, M. (2018). Electrification and Challenging Our Preconceptions [Viewpoint]. *IEEE Electrification Magazine*, 6(4), 94–100. <https://doi.org/10.1109/MELE.2018.2871324>
- Pacheco, F. E., & Foreman, J. C. (2017). Microgrid Reference Methodology for Understanding Utility and Customer Interactions in Microgrid Projects. *Electricity Journal*, 30(3), 44–50. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2017.03.005>
- Sanchez Upegui, A. (2010). ¿Qué es caracterizar? *Fundación Universitaria Católica Del Norte*.
- Sivarasu, S. R., Chandira Sekaran, E., & Karthik, P. (2015). Development of renewable energy based microgrid project implementations for residential consumers in India: Scope, challenges and possibilities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 256–269. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.118>
- Soshinskaya, M., Crijns-Graus, W. H. J., Guerrero, J. M., & Vasquez, J. C. (2014). Microgrids: Experiences, barriers and success factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 659–672. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.07.198>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2018). *Diagnóstico de la prestación del servicio de energía eléctrica 2018*. Retrieved from www.superservicios.gov.co
- Thiam, D. R. (2010). Renewable decentralized in developing countries: Appraisal from microgrids project in Senegal. *Renewable Energy*, 35(8), 1615–1623. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.01.015>
- UPME. (2015). Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050. *Unidad de Planeación Minero Energética*, 184. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3518-5.00007-4>
- Vides-Prado, A., Camargo, E. O., Vides-Prado, C., Orozco, I. H., Chenlo, F., Candelo, J. E., & Sarmiento, A. B. (2018). Techno-economic feasibility analysis of photovoltaic systems in remote areas for indigenous communities in the Colombian Guajira. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.101>
- Vinci, S., Boampong, R., Phillips, M. A., Cader, C., Blechinger, P., Bertheau, P., ... IEA. (2017). Energy Access Outlook 2017: From poverty to prosperity. *Energy Procedia*, 94(March), 144. <https://doi.org/10.1787/9789264285569-en>

- Williams, N. J., Jaramillo, P., Taneja, J., & Ustun, T. S. (2015). Enabling private sector investment in microgrid-based rural electrification in developing countries: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1268–1281. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.153>
- Wolsink, M. (2012). The research agenda on social acceptance of distributed generation in smart grids: Renewable as common pool resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 822–835. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.006>
- Wu, L., Ortmeyer, T., & Li, J. (2016). The community microgrid distribution system of the future. *Electricity Journal*, 29(10), 16–21. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2016.11.008>
- XM. (2019). *Precio Promedio Ponderado Diario de energía Transada en Abril de 2019 mediante Contratos de largo plazo entre Comercializadores y Usuarios No Regulados*.

Anexo A - Consistencia dimensional de todas las variables, niveles, flujos y parámetros del modelo

Variable, Nivel, Flujo o Parámetro	Unidad
% ahorro para reposición	%
% Atención Diesel	%
% CI que se puede cubrir	%
% Cobertura Diesel	%
% cobertura solar	%
% Demanda No Atendida	%
% uso en PP	%
Accesibilidad comunidad - vivienda	%
Ahorros para reposiciones	USD
Auxiliar_1	kWh
Auxiliar_2	kW
Años	años
Baterías	kW
Baterías por Reemplazar	kW
Baterías Requeridas	kW
Brecha de Energia	kWh
Brecha de Potencia	kW
CAPEX	USD
CI Diesel	kW
CI percapita	kW/personas
CI que se puede construir	kW
CI Requerida	kW
CI Solar	kW
CI Total	kW
Construcción de Viviendas	vivienda
Costo de instalacion - conexion	USD

Costo del kW de Almacenamiento	USD/kW
Crecimiento demanda AP	kW
Curva de carga alumbrado publico	kW
Curva de carga centro comunitario	kW
Curva de carga Centro de Salud	kW
Curva de carga Escuela	kW
Curva de carga residencial	kW/vivienda
Curva de Carga Total	kW
Demanda Electrica	kWh
Demanda Electrica Acumulada	kWh
Demanda no atendida	kWh
Demanda no atendida acumulada	kWh
Demanda Pico	kW
Demanda Pico Actividades Productivas	kW
Demanda Pico Infraestructura Publica	kW
Demanda Pico Residencial	kW
Desgaste	kW
Desgaste CID	kW
Dinero disponible para inversión	USD
Excedentes para reposición	USD
Factor cobertura baterias	N.A.
FAZNI	USD
Gastos AOM	USD
Gastos Diesel	USD
Gastos Reposición Baterias	USD
Generación	kWh
Generación Diesel	kWh
Generación Potencial	kWh
Generación Potencial Diesel	kWh

Generación Solar	kWh
Horas de servicio diesel	h
Horas de servicio solar	h
Horas servicio total	h
Ingresos por tipo de comunidad	h
Inversión Módulo PV e Inversores x kW	USD/kW
Margen	N.A.
Margen de Energia	N.A.
Margen de Potencia	N.A.
Migración	personas
Muertes	personas
Nacimientos	personas
NCIxE	kW
NCIxP	kW
Nueva CI Diesel	kW
Nueva CI Solar	kW
Organización del a Comunidad	%
Otros Fondos	USD
Otros subsidios	USD
Personas por Vivienda	personas/vivienda
Personas que requieren casa	personas
Población	personas
Población año anterior	personas
Precio del Diesel	USD/kWh
Proyección DE	kWh
Radiación Solar	kWh/m ²
Recaudo	USD
Recursos Financieros MicroRed	USD
Reemplazo Baterias	kW

Tarifa	USD/kWh
Tasa de conexión	%
TB Migración	%
TB Mortalidad	%
TB Natalidad	%
Viviendas	vivienda
Viviendas a construir	vivienda
Viviendas Conectadas	vivienda
Recaudo (Z)	USD